7º APSul AMÉRICA
Congresso Sul-Americano de Agricultura de Precisão e Máquinas Precisas

E-BOOK OFICIAL

Agricultura 4.0
Inovação diante dos desafios climáticos econômicos e sociais

E-BOOK
CAPÍTULOS DE LIVRO DOS TRABALHOS APRESENTADOS NO 7º CONGRESSO SUL-AMERICANO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO E MÁQUINAS PRECISAS
4ª Edição

EDITORA CESPOL/UFSM
ISBN nº 978-65-990392-6-3

ISBN 978-65-990392-6-3

PREFEITURA MUNICIPAL DE NÃO-ME-TOQUE, RS
SINDICATO RURAL DE NÃO-ME-TOQUE
SISTEMA FARSUL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
COTRIJAL

CONGRESSO SUL-AMERICANO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO E MÁQUINAS PRECISAS
Tema: "Agricultura 4.0 – Inovação Diante dos Desafios, Climáticos, Econômicos e Sociais".

7ª Edição

23 e 24 de setembro de 2025

E-BOOK

CAPÍTULOS DE LIVRO DOS TRABALHOS APRESENTADOS NO 7º CONGRESSO SUL-AMERICANO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO E MÁQUINAS PRECISAS

4ª Edição

Organização Lúcio de Paula Amaral

Não-Me-Toque – RS, Brasil

2026

ISBN 978-65-990392-6-3

ORGANIZAÇÃO/REALIZAÇÃO DO EVENTO

ORGANIZADORES

PATROCÍNIO DIAMANTE

PATROCÍNIO OURO

PATROCÍNIO PRATA

PATROCÍNIO BRONZE

APOIADORES

EXPOSITORES

COMISSÃO ORGANIZADORA

Diretoria do APSUL AMÉRICA

Presidente do APSUL: Teodora Berta Souilljee Lütkemeyer (Sindicato Rural)
Coordenador Técnico do Evento: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado (UFSM)
Coordenador do Comitê Científico do Evento: Prof. Dr. Lúcio de Paula Amaral (UFSM)

Membros do APSUL AMÉRICA

Cristina Napp – Prefeitura Municipal de Não-Me-Toque, RS
Leonardo Kerber – COTRIJAL
Lúcio de Paula Amaral – UFSM/PPGAP
Paulo Junior Gomes da Silva – Prefeitura Municipal de Não-Me-Toque, RS
Silvio Van Vught – Sindicato Rural de Não-Me-Toque, RS
Telmo Jorge Carneiro Amado – UFSM/PPGAP
Teodora Berta Souilljee Lütkemeyer – Sindicato Rural de Não-Me-Toque, RS
Umberto Moraes – SENAR/RS

Equipe de Apoio

Ana Cláudia Stumm – COTRIJAL
Anna Júlia Lütkemeyer – Sindicato Rural de Não-Me-Toque, RS
Cintia Roberta dos Santos Dal Vesco - Stara
Flávia Fritzen – Sindicato Rural de Não-Me-Toque, RS
Katiusca Oliveira – Prefeitura Municipal de Não-Me-Toque, RS
Leonardo Kerber – COTRIJAL
Michele Souilljee Birck – Sindicato Rural de Não-Me-Toque, RS
Nicole Andreza Daudt – Prefeitura Municipal de Não-Me-Toque, RS
Paulo Junior Gomes da Silva – Prefeitura Municipal de Não-Me-Toque, RS
Rosaura Allebrandt – Prefeitura Municipal de Não-Me-Toque, RS
Stefano Santos – BRABO Marketing
Thomas Liska – Stara

Membros do Comitê Científico (Lista de Revisores e Pareceristas *ad hoc*)

REVISOR	AFILIAÇÃO	Relação com o PPGAP/UFSM
Airton Polon	ROJ	Egresso
Alberto Eduardo Knies	UERGS	----------
Alessandro Carvalho Miola	UFSM	----------
Alexandre Russini	UFSM	Docente Permanente
Alexandre Schafer	Stara	Egresso
Alexandro R. da Silva Júnior	UFSM	----------
Aline de Oliveira Fogaça	Vinícola Velho Amâncio	----------
Aline Lampert Dutra	UFSM	----------
Amanda avozani	Universidade do Texas	Egressa
Ana Caroline Benedetti	UFSM	----------
André Luiz Vian	UFRGS	----------
André Müllich	FARM 360	Discente
Antoninho João Pegoraro	UFSM	----------
Arlei Bonet	UFSM	----------
Bruna Trevizan Paese	UFSM	----------
Carlos Alberto Rigo Junior	Faz. Irmãos Rigo	Discente
Christian Bredemeier	UFRGS	Docente Permanente
Claire Delfini Viana Cardoso	UFSM	Docente Colaboradora
Cláudia das Neves Costa	UFSM	----------
Cristiano Carvalho da Silva	UFSM	----------
Deoclides de Oliveira Neto	DPRF - MJ	Egresso
Diogo Belmont Lippert	UFSM	----------
Eduardo Leonel Bottega	UFSM	Docente Permanente
Emanuel Araújo da Silva	UFSM	----------
Ezequiel Gasparin	UFSM	----------
Fernando Coelho Eugênio	UFVJM	----------
Gerson dos Santos Lisboa	UFG	----------
Gianlucca Pigatto	SLC Máquinas	Discente
Gilvan Moisés Bertollo	UFSM	----------
Giovanna Gelak Spinelli	DALLFRIGO	Egressa
Hendrik da Costa de Souza	UFSM	----------
Henrique Araujo Barichello	UFSM	----------
Ingrid de Oliveira C. Lima	----------	Discente
Igor Madruga de Oliveira	CARGIL	Egresso
Ivan Carlos Maldaner	UFSM	Docente Permanente
Jaime Freiberger Junior	UFSM	----------
Jaqueline Sgarbosa	IFAR	Docente Permanente
Jean Michel Moura Bueno	UFSM	----------
João Fernando Zamberlan	AGORURBIS; URI	----------
João Batista da Silva Santos	J.ASSY	Discente
José Bredow	----------	Discente
José Cardoso Sobrinho	UFSM	Docente Permanente
Juliano Dalcin Martins	UFSM	Docente Permanente
Larissa Barden Meira	Produtora Rural	Discente
Leonardo Seibel Sander	Stara	Discente

ISBN 978-65-990392-6-3

REVISOR	AFILIAÇÃO	Relação com o PPGAP/UFSM
Leonardo Mello Foletto	Stara	Discente
Liane de Souza Weber	UFSM	----------
Lucas Cagliari Grando	TELUS AGRICULTURE	Discente
Luan Pierri Pott	GDM	----------
Luciano Gebler	EMBRAPA	Docente Permanente
Lúcio de Paula Amaral	UFSM	Docente Permanente
Luís Felipe Rech	UFSM	----------
Luís Felipe Rossetto Gerlach	UFRGS	Egresso
Luiz Felipe Díaz de Carvalho	UFSM	Docente Permanente
Luiz Felipe Silveira Pavão	FARM 360	----------
Luiz Patric Kaizer	UFSM	Docente Permanente
Marcelo Silveira de Farias	UFSM	Docente Permanente
Marco Ivan R. Sampaio	AGROURBIS; UNICRUZ	Egresso
Marcus Henrique Alberto	COAMO	Egresso
Maria Eduarda Hitz	AGROSER CASE IH	Discente
Maria Silvia Pardi Lacruz	UFSM	Docente Colaboradora
Mateus Junior R. Sangiovo	UFSM	----------
Mateus Sabadi Schuh	SMMA/PMSM	----------
Mateus Santos Ribeiro	Telechea Agroambiental	Discente
Murilo Vargas Lunardi	ALLIANZA	Discente
Nádia Mariane Mucha	UFSM	----------
Paulo Eugenio Baccin	SEST SENAT; UNIFRA	Discente
Pedro Seeger da Silva	UFSM	----------
Rafael H. de Freitas Noronha	UFSB	----------
Régis Ruoso	UFSM	----------
Roberta Aparecida Fantinel	UFES	----------
Rozymario B. Fagundes	----------	Egresso
Sally Déborah P. da Silva	UFSM	----------
Telmo Jorge Carneiro Amado	UFSM	Docente Permanente
Vinicius Kaster Marini	UFSM	Docente Permanente
Vinicius Ritcher	UFSM	----------
Wagner Nart Macedo	AGROGERENCIAL	Discente
Zanandra Boff de Oliveira	UFSM	Docente Permanente

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA - UFSM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO (PPGAP/UFSM)
MESTRADO PROFISSIONAL EM AGRICULTURA DE PRECISÃO
COLÉGIO POLITÉCNICO DA UFSM

Responsabilidade pela edição do Livro Digital:
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão – PPGAP
Prof. Dr. Lúcio de Paula Amaral

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Colégio Politécnico da UFSM
Prédio 70, Bloco F, Sala 211-A, Santa Maria, RS - Brasil, CEP 97.105-900, Camobi.
Telefone: (55) 3220 8059
e-mail: ppgap.politecnico@ufsm.br

Organização do Livro Digital
Prof. Dr. Lúcio de Paula Amaral

Diagramação do Livro Digital
Prof. Dr. Lúcio de Paula Amaral
Engª. Florestal Msc. Sally Deborah Pereira da Silva

Arte da Capa do Livro Digital
Stefano Santos

Ano da Publicação do E-book 2026
ISBN 978-65-990392-6-3

EDITORA CESPOL
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Colégio Politécnico da UFSM
Prédio 70, Bloco A, Sala A13, Santa Maria, RS - Brasil, CEP 97.105-900, Camobi.
Telefone: (55) 3220 9419 – Ramal 214
e-mail: cespol@ufsm.br

As opiniões, conceitos, afirmações e conteúdo desta publicação são de exclusiva e de inteira responsabilidade dos autores.
Todos os direitos reservados. A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

C749t Congresso Sul Americano de Agricultura de Precisão e Máquinas Precisas (7. : 2025 : Não-Me-Toque, RS)
Capítulos de livro dos trabalhos apresentados VII Congresso Sul Americano de Agricultura de Precisão e Máquinas Precisas [recurso eletrônico] / VII Congresso Sul Americano de Agricultura de Precisão e Máquinas Precisas, 23 e 24 de setembro de 2025; organização Lúcio de Paula Amaral. – Não-Me-Toque, RS : Prefeitura Municipal, Sindicato Rural, Sistema FARSUL; Santa Maria, RS : UFSM, COTRIJAL, PPGAP, CESPOL, 2025.
1 e-book : il.

Tema: "Agricultura 4.0 – Inovação Diante dos Desafios, Climáticos, Econômicos e Sociais"
ISBN 978-65-990392-6-3

1. Agricultura de precisão – Eventos 2. Agricultura digital – Eventos 3. Agricultura 4.0 – Eventos 4. Tecnologias agrícolas 5. Mecanização agrícola 6. Geotecnologias I. Amaral, Lúcio de Paula II. Título.

CDU 631.15(063)
631.17(063)
631.95(063)

Ficha catalográfica elaborada por Paula Schoenfeldt Patta - CRB-10/1798 Biblioteca Central da UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

PREFÁCIO

A **Agricultura de Precisão** busca **adoção e evolução** para ampliar sua adoção e consolidar-se **nos diferentes segmentos da sociedade** - campo, indústria, economia, academia, governanças, dentre outros. O **Congresso Sul-Americano de Agricultura de Precisão e Máquinas Precisas - APSUL AMÉRICA**, é um evento bienal de **destaque na área de Agricultura de Precisão (AP**) e **máquinas precisas**, que promove a integração entre instituições de ensino, pesquisa e extensão (acadêmicos, professores, pesquisadores e extensionistas), entidades governamentais, empresas fabricantes de máquinas, componente e *softwares*, *startups*, prestadores de serviços, produtores rurais e usuários das tecnologias de AP.

A 7ª edição do **APSUL AMÉRICA** foi realizada nos dias 23 e 24 de setembro de 2025, em um **contexto** de **pós-pandemia**, em que o país passou por **diversas instabilidades** causadas pela **política**, pela **economia**, **insegurança jurídica** e por **eventos climáticos extremos**, que impactaram significativamente o país. A **região Sul** esteva entre as mais afetadas, enfrentando alternadamente **enchentes** e **estiagens**, caracterizadas por **baixos índices de precipitações, distribuição irregular de chuvas** e **altas temperaturas** associadas a **ondas de calor intenso**, que **impactaram duramente** os **sistemas produtivos agrícolas**.

Diante desse contexto altamente desafiador, a agricultura brasileira tem demonstrado capacidade de **resistência** e busca **ser resiliente**. Paralelamente, **destacam-se tecnologias emergentes** no **campo**, na **indústria** e em outros **setores da economia**, como **inteligência artificial**, **automação**, **robótica** e **agricultura digital**, acompanhada da crescente demanda por **conectividade** para **suporte** à aquisição, processamento e gestão de **dados** para **operações** nas **lavouras**. Contudo, esse avanço tecnológico ocorre em meio a uma **expressiva carência** de **mão-de-obra qualificada, impondo maiores desafios ao setor**.

Foi **neste cenário** que o **APSUL AMÉRICA** propôs o **debate** em torno do tema "**Agricultura 4.0 – Inovação diante dos desafios climáticos, econômicos e sociais**". A **organização do 7º. APSUL** considerou o **momento delicado** e as **incertezas atualmente enfrentadas** pela **agricultura**, optando por **reunir agricultores e representantes do agronegócio** que utilizam **Agricultura de Precisão, Máquinas Precisas e Agricultura Digital**, para **aprimorar** o **desempenho técnico**, **econômico** e **ambiental** de suas **atividades**. O congresso criou um **espaço** de **diálogo qualificado**, ao **acolher ideias** e **promover discussões**, onde o **setor unido buscou elaborar soluções práticas, sustentáveis e duradouras**.

A **resposta** do **público** foi **expressiva**, com mais de **850 participantes presentes** no 7º APSUL AMÉRICA, além de um **público significativo** nas transmissões *on line*, **superando o recorde de participações** das edições anteriores. O congresso contou com a presença de

ISBN 978-65-990392-6-3

produtores rurais, **técnicos de empresas privadas**, **cooperativas**, **instituições de ensino**, **pesquisa** e **extensão**, **consultores**, **estudantes** de **diversos níveis de formação** e **qualificação técnico-científico**, além de **expositores**, **painelistas**, **autoridades nacionais** e **internacionais**, dentre outros.

A **programação** abordou **temas estratégicos** para o **setor**, incluindo **atualização na recomendação de fertilizantes e corretivos** e uso de **inteligência artificial**, o papel da **gestão** e da **inovação** em **tempos desafiadores** para a **agricultura**, **inovação** e **empreendedorismo** no **setor de máquinas agrícolas**, **tendencias** da **Agricultura de Precisão** nos **Estados Unidos**, **Argentina**, **Brasil** e **Holanda**, **agricultura conservacionista** – **solo sem erosão e com muita biologia**, o **desafio** do **agronegócio brasileiro** – **ser eficiente** e **reconhecido pela sociedade**, **tecnologias inovadoras** – **agricultura digital**, dentre outros assuntos de elevada relevância.

Como **inovação** nesta edição, foram **realizadas**, pela **primeira vez**, atividades ao ar livre, sendo as "**Demonstrações dinâmica de drones**", "**Demonstrações estáticas de máquinas precisas**" e a **Premiação dos melhores trabalhos por temática,** apresentados na Seção de Apresentação de Trabalhos Técnico-Científicos do APSUL AMÉRICA. O **público apreciou** estas novas atividades.

Neste **4º E-Book (2026)**, referente à **7ª edição** do **APSUL AMÉRICA (2025)**, **disponibilizamos**, **na integra**, os **trabalhos apresentados** no congresso, organizados na forma de **88 capítulos de livro**, estruturados em **quatro categorias temáticas**, sendo **Manejo Específico de Sítio de Solo e Planta**, **Geotecnologias Aplicadas à Agricultura de Precisão**, **Máquina Agrícolas Desenvolvidas para Agricultura de Precisão**, **Descrição de Caso Técnico** e/ou **Relato de Experiência**.

A Comissão Organizadora do 7º Congresso Sul-Americano de Agricultura de Precisão e Máquinas Precisas agradece a todos os participantes e demais envolvidos no evento, que superou as expectativas e às edições anteriores. **O nosso obrigado a todos**.

Não-Me-Toque, RS, Brasil, 10 de março de 2026.

Prof. Dr. Lúcio de Paula Amaral
Coordenador do Comitê Científico
Representando a Organização do 7º APSUL AMÉRICA
e o PPGAP/UFSM.

PREFACE

Precision Agriculture seeks adoption and evolution to expand its adoption and consolidate itself in **different segments of society** - agriculture, industry, economics, academia, governance, among others. The **South American Congress on Precision Agriculture and Precision Machinery - APSUL AMERICA**, is a prominent biennial event in the field of **Precision Agriculture (PA) and precision machinery**, which promotes integration between educational, research, and extension institutions (academics, professors, researchers, and extension agents), government entities, machinery, component, and software manufacturers, startups, service providers, farmers, and users of precisian agriculture technologies.

The 7th edition of **APSUL AMÉRICA** was held on September 23 and 24, 2025, in a **post-pandemic context**, in which the country experienced **various instabilities** caused by **politics**, the **economy**, **legal uncertainty**, and **extreme weather events**, which significantly impacted the country. The **Southern Region** was among the most affected, facing alternating **floods** and **droughts**, characterized by **low rainfall**, **irregular distribution of rainfall**, and **high temperatures** associated with **intense heat waves**, which **severely impacted agricultural production systems**.

Faced with this highly challenging context, Brazilian agriculture has demonstrated its capacity for **resistance** and seeks to be **resilient**. At the same time, **emerging technologies** in the **field**, **industry**, and **other sectors** of the **economy** stand out, such as **artificial intelligence**, **automation**, **robotics** and **digital agriculture**, accompanied by growing demand for **connectivity** to **support** the acquisition, processing, and management of **data** for **crop operations**. However, this technological advancement is occurring amid a **significant shortage** of **skilled labor**, **posing greater challenges to the sector**.

It was **in this scenario** that **APSUL AMÉRICA** proposed a **debate** on the theme "**Agriculture 4.0 - Innovation in the face of climatic, economic, and social challenges.**" The **organizers of the 7th APSUL** considered the **delicate moment** and the **uncertainties currently faced by agriculture**, choosing to **bring together farmers** and **agribusiness representatives** who use **Precision Agriculture**, **Precision Machinery** and **Digital Agriculture** to improve the **technical**, **economic**, and **environmental performance** of their **activities**. The congress created a **space** for **qualified dialogue**, **welcoming ideas** and **promoting discussions**, **where the united sector sought to develop practical, sustainable, and lasting solutions**.

The **public response** was **significant**, with more than **850 participants** attending the 7th APSUL AMÉRICA, in addition to a **significant audience** watching online broadcasts, **surpassing the record attendance** of previous editions. The congress was attended by **farmers**, **technicians from private companies**, **cooperatives**, **educational**, **research** and

extension institutions, **consultants**, **students** from **various levels of training** and **technical-scientific qualification**, as well as **exhibitors**, **panelists**, **national** and **international authorities**, among others.

The **program** addressed **strategic topics** for the **sector**, including **updates on fertilizer and soil amendment recommendations** and the use of **artificial intelligence**, the role of **management** and **innovation** in c**hallenging times for agriculture**, **innovation** and **entrepreneurship** in the **agricultural machinery sector**, **trends** in **Precision Agriculture** in the **United States**, **Argentina**, **Brazil** and the **Netherlands**, **conservation agriculture** – **soil without erosion and with a lot of biology**, the **challenge** of **Brazilian agribusiness** – **being efficient and recognized by society**, **innovative technologies** – **digital agriculture**, among other highly relevant topics.

As an **innovation** in this edition, outdoor activities were held for the **first time**, including "**Dynamic drone demonstrations**", "**Static demonstrations of precision machinery**" and the **Award Ceremony for the best works by theme**, presented in the Technical-Scientific Works Presentation Section of APSUL AMERICA. The public enjoyed these new activities.

In this **4th E-Book (2026)**, referring to the **7th edition of APSUL AMÉRICA (2025)**, we **make available**, **in their entirety**, the works presented at the congress, organized in the form of **book chapters**, structured into **four thematic categories**: **Specific Soil and Plant Site Management**, **Geotechnologies Applied to Precision Agriculture**, **Agricultural Machinery Developed for Precision Agriculture**, **Technical Case Description and/or Experience Report**.

The Organizing Committee of the 7th South American Congress on Precision Agriculture and Precision Machinery would like to thank all participants and others involved in the event, which exceeded expectations and previous editions. Our thanks to everyone.

Não-Me-Toque, RS, Brazil, March 10, 2026.

Prof. Dr. Lúcio de Paula Amaral
Coordinator of the Scientific Committee
Representing the Organization of the 7th APSUL AMERICA
and PPGAP/UFSM.

SUMÁRIO

SEÇÃO 1 – TRABALHOS PREMIADOS NO 7º CONGRESSO APSUL AMÉRICA 2025 21

Premiação dos melhores trabalhos no 7º APSUL AMÉRICA 2025 22
Lúcio de Paula Amaral; Zanandra Boff de Oliveira; Eduardo Leonel Bottega; Telmo Jorge Carneiro Amado; Teodora Lütkemeyer.

CAPÍTULO 1 – Recomendação de taxa variada de sementes de soja em diferentes zonas de manejo – smartgrid grupo Don Mario 25
Luan Pierre Pott; Maximiliano Sabino; Raí Schwalbert; Junior Sandri; Weslei Graffunder; Mariany Domingues; Marcelo Suk.

CAPÍTULO 2 – Modeling maize yield using artificial neural networks integrating vegetation indices and environmental variables 36
Amanda Avozani, Lúcio de Paula Amaral, Luiz Patric Kayser, Telmo Jorge Carneiro Amado, Felipe Guadagnini Leite, Luciano Zucuni Pes.

CAPÍTULO 3 – Semeadura de precisão: estado da arte e tendências para o futuro 51
João Batista da Silva Santos; Vinicius Kaster Marini.

CAPÍTULO 4 – Agricultura de precisión en Argentina: desde la incorporación tecnológica hasta gestión estratégica de datos 64
Fernando Scaramuzza.

SEÇÃO 2 – ÁREA TEMÁTICA: MANEJO ESPECÍFICO DE SÍTIO DE SOLO E PLANTA 73

CAPÍTULO 5 – Efeitos da aplicação de fungos micorrízicos na cultura da soja em ano de estresse hídrico 74
Danilo da Costa Soares; Eduardo Leonel Bottega; Gabriel Mergen Rohrs; Zanandra Boff de Oliveira; Telmo Jorge Carneiro Amado; Alberto Eduardo Knies; Gustavo Bock Bernhard; Carlos Eduardo da Silva.

CAPÍTULO 6 – Simulação da necessidade de irrigação para a cultura da soja para um ano de el niño e um ano de la niña em cenários de aumento de temperatura .. 87
Zanandra Boff de Oliveira; Eduardo Leonel Botteg; Juliano Arthur Drescher; Bruno Gabriel Mayerhofer; Rafael Röhrs Borges; Beatriz Mariana; Rafaela Fauth Bisol; Alberto Eduardo Knies.

CAPÍTULO 7 – Variabilidade espacial da produtividade relativa da soja estimada em três safras de la niña no Rio Grande do Sul 98
Bruna Rathke; Zanandra Boff de Oliveira; Eduardo Leonel Bottega; Reyel Kiefer Unfer; Pedro Eduardo Fischer Boeno; Ana Luíza Canto da Silva; José Alexandre Bredow.

CAPÍTULO 8 – Condições meteorológicas atuais no ano agrícola 2024/25 e estimadas com o acréscimo da temperatura do ar para a cultura da soja 109
Zanandra Boff de Oliveira; Gianlucca Pigatto; Juliano Arthur Drescher; Bruno Gabriel Mayerhofer; Beatriz Mariana; Rafaela Richardt Piazza; Carlos Eduardo Da Silva; Gustavo Bock Bernhard.

CAPÍTULO 9 – Resistência do solo a penetração diagnosticada em grade amostral e em ambientes de produção 121
Julio Gustavo Buchholz; Antonio Luís Santi; Antonio Gutheli; Renan da Rosa; André Felipe De Conti; João Vitor Heaflinger; Willian José Junges; Igor Cotica Gnoatto.

CAPÍTULO 10 – Efeito de sistemas de manejo de inverno na distribuição vertical de atributos químicos do solo 132
Renan da Rosa; Antônio Luis Santi; Diego Armando Amaro da Silva; Maurício Guilherme Stein Vian; Amanda Trentin Moro; Willian José Junges; Amanda Fornari; Julio Gustavo Buchholz.

CAPÍTULO 11 – Metodologia para seleção de informação espectral e predição de parâmetros agronômicos no milho utilizando sensor multiespectral embarcado em VANT 148
Charleston dos Santos Lima; Ana Júlia Teixeira; Bárbara Nogueira; André Luís Vian; Ivan Ricardo Carvalho; Christian Bredemeier.

CAPÍTULO 12 – Comportamento da enzima beta-glicosidase em diferentes ambientes de produção na Região Central do Rio Grande do Sul 163
João Vittor Haefliger Camargo; Antônio Luis Santi; Reyllis Unfer; Renan da Rosa; Gilvan Moisés Bertollo; Gabriel Thiel Prevedello; Nicole Bonini; Willian José Junges.

CAPÍTULO 13 – Variabilidade espacial e temporal da atividade enzimática da fosfatase ácida em Latossolo Vermelho 174
Amanda Fornari; Antônio Luis Santi; Guilherme Rechden Lobato; Renan da Rosa; Julio Gustavo Buchholz; André Felipe de Conti; Vitor Eduardo Schardong; Murilo S. Trentin.

CAPÍTULO 14 – Determinação e distribuição espacial de bioindicadores de qualidade do solo em sistemas de manejo de inverno no Sul do Brasil 186
Willian José Junges; Antônio Luis Santi; Diego Armando Amaro da Silva ; Renan da Rosa; Gilvan Moisés Bertollo; Amanda Fornari; Nicole Bonini, Henrique Onofre Cerbaro.

CAPÍTULO 15 – Agricultura digital e de precisão: análise da promoção de políticas públicas no Médio e Alto Uruguai, Rio Grande do Sul, Brasil 203
Gabriel Thiel Prevedello; Antônio Luis Santi; Schayana Pavelski; Thaís Camila Griebler; Murilo Santi Trentin; Amanda Trentin Moro; Amanda Fornari.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 16 – Efeito de sistemas de manejo de inverno na variabilidade horizontal e vertical dos atributos químicos e físicos do solo 221
Thaís Camila Griebler; Antônio Luis Santi; André Felipe de Conti; Renan da Rosa; Diego Armando Amaro da Silva; João Vittor Haefliger Camargo; Murilo Santi Treintin; Julio Gustavo Buchholz.

CAPÍTULO 17 – Potencial de sequestro de carbono a partir da intensificação agrícola no RS 235
Thaís Camila Griebler; Antônio Luis Santi; Renan da Rosa; Gilvan Moisés Bertollo; Willian José Junges; Amanda Fornari; Vitor Eduardo Schardong; Julio Gustavo Buchholz.

CAPÍTULO 18 – Potencial da fotogrametria de VANT para o monitoramento estrutural de florestas nativas: estudo de caso na Floresta Estacional Decidual em Frederico Westphalen-RS 249
Emanuel Araújo Silval; Fábio Marcelo Breunig; Messias Carneiro Soares, Marco Antonio Kramm, Gerson dos Santos Lisboa, Lúcio de Paula Amaral, Gabriel Paes Marangon; Anelisa Pedroso Finger.

CAPÍTULO 19 – Avaliação geoespacial da resistência do solo à penetração em lavoura com potencial de alta produtividade de soja 267
Amanda Fornari; Antônio Luis Santi; Luís Felipe Rossetto Gerlach; Renan da Rosa; Vitor Eduardo Schardong; Gabriel Thiel Prevedello; Amanda T. Moro; Willian J. Junges.

CAPÍTULO 20 – Uso de índice de qualidade do solo na definição de planos de manejo inteligentes em área manejada com agricultura de precisão 279
Willian José junges; Antônio Luis Santi; André Felipe de Conti; Renan da Rosa; Diego Armando Amaro da Silva; Vitor Eduardo Schardong; Amanda Fornari; Thaís C. Griebler.

CAPÍTULO 21 – Input de diferentes variáveis como estratégia na delimitação de zonas de manejo em vinhedos da Campanha Gaúcha 294
Bruna Trevizan Paese; Jean Michel Moura Bueno; Gustavo Brunetto; Ricardo Simão Diniz Dalmolin; Lúcio de Paula Amaral; Fabrício de Araújo Pedron; Noeme da Costa Santos; Luís Felipe Rech.

CAPÍTULO 22 – Diagnóstico da adubação e correção do solo através de taxa variável em propriedade localizada no Vale do Araguaia 310
Nicole Bonini; Antônio Luis Santi; Higor Juliano Pretto Dapper; Renan da Rosa; Gilvan Moisés Bertollo; André Felipe De Conti; Vitor Eduardo Schardong; Julio G. Buchholz.

CAPÍTULO 23 – Ciclagem de nutrientes e produtividade de grãos influenciada pela partição da fertilização nitrogenada entre a cultura de cobertura e o trigo 325
Mateus Junior R. Sangiovo; Claudir José Basso; Telmo Jorge C. Amado; Ana Paula Maccari; Lucindo Somavilla; Mariana R. de Ávila; Rodrigo Buffon; Lúcio de P. Amaral.

CAPÍTULO 24 – Desempenho da cultura do milho em sucessão a diferentes espécies de cobertura e aplicação de corretivo 337
Vitor Eduardo Schardong; Antônio Luis Santi; Bruno Henrique Rodrigues Sangiovo; André Felipe De Conti; Renan da Rosa; Julio Gustavo Buchholz; Wiliam José Jungens; Amanda Fornari.

CAPÍTULO 25 – Desempenho da cultura da soja sob diferentes manejos fitossanitários e regimes hídricos 353
Richard Massirer Prochnow; Raissa Wolffenbüttel; Érika Batista Feron; João Gabriel Fortes Peixoto; Dienifer Weirich Lopes; Lorenzo Isasmendi da Silveira; Milena Ferreira da Silva Zühl; Alberto Eduardo Knies.

CAPÍTULO 26 – Relação dos níveis de potássio foliar e índice de vegetação por diferença normalizada (ndvi) na cultura da soja 363
Aline Lampert Dutra; André Müllich; Luiz Felipe Silveira Pavão; Alessandro Carvalho Miola; Ivan Carlos Maldaner; Luciano Zucuni Pes; Marcelo Silveira de Farias; Cláudia das Neves Costa.

CAPÍTULO 27 – Efeitos de inoculações e regimes hídricos na performance da cultura da soja 374
Rafael Augusto Karsburg; Camilla da Silva Rodrigues; Milena Ferreira da Silva Zühl; Érika Batista Feron; Raissa Wolffenbuttel; Érika Nunes Macedo; Lorenzo Isasmendi da Silveira; Alberto Eduardo Knies.

CAPÍTULO 28 – Manejo sítio-específico de população de plantas de milho em diferentes zonas de manejo 390
Mathias Sasseti Klein; José Luiz Balansin Finatto; Gabriel Sasseti Klein; Diego Alessio.

CAPÍTULO 29 – Impacto na escolha de diferentes métodos de interpolação dos mapas de prescrição de calagem 404
André Müllich; Ingrid Lima; José Bredow; Régis Ruoso; Lúcio de Paula Amaral.

CAPÍTULO 30 – Arranjos espaciais na cultura da soja sob diferentes regimes hídricos 418
Wellington da Silva; Vitor Hugo Agarriberri Dittberner; Ana Luiza Souza Mesquita; Érika Nunes Macedo; Milena Ferreira da Silva Zühl; Taís Gonçalves Pinto; Zanandra Boff de Oliveira; Alberto Eduardo Knies.

CAPÍTULO 31 – Desempenho da cultura do milho em função de diferentes regimes hídricos e espaçamentos entre linhas 431
Milena Ferreira da Silva Zühl; Felipe Cherobini; Ana Luiza Souza Mesquita; Érika Nunes Macedo; Richard Massirer Prochnow; Wellington da Silva; Zanandra Boff de Oliveira; Alberto Eduardo Knies.

CAPÍTULO 32 – Evolução dos teores de pH e matéria orgânica do solo de um talhão manejado com ferramentas da agricultura de precisão 446
Emanoel Rolim Farias da Silva; Guilherme Scapin Muniz; Lucas Steffanello; Lucas Cagliari Grando; Ivan Carlos Maldaner; Marcelo Silveira de Farias; Jaqueline Sgarbossa; Luciano Zucuni Pes.

CAPÍTULO 33 – Comparação de métodos para definição de zonas de manejo a partir de mapa de colheita 456
Luís Felipe Rossetto Gerlach; Andre Luis Vian; Christian Bredemeier; Márcio Gabriel Motke Wrubleski; Teresa Enderle; Thauhana Cássia Gasparotto Kuhn; Thiago Santos Cocco.

CAPÍTULO 34 – Efeitos de inoculações e irrigação suplementar no cultivo do milho safrinha 466
Taís Gonçalves Pinto; Érika Batista Feron; João Gabriel Fortes Peixoto; Raissa Wolffenbuttel; Richard Massirer Prochnow; Marcus Vinícius Tres; Giovani Zabot; Alberto Eduardo Knies.

CAPÍTULO 35 – Produtividade do milho (zea mays) sob agricultura de precisão influenciada por culturas antecessoras e fontes nitrogenadas 477
Henrique Onofre Cerbaro; Antônio Luiz Santi; Alexandre Wahlbrinck Volz; Renan da Rosa; Thais Camila, Mauricio Vian, Gilvan Moisés Bertollo, João Vittor H. Camargo.

CAPÍTULO 36 – Avaliação dos teores de matéria orgânica nos solos do Rio Grande do Sul 493
Emanueli Ludwig Michelin; Rafael Sobroza Becker; Natalia Lopes; Jaime Miguel Weber; Priscila Pacheco Mariani; Maicon William Holzschuh.

CAPÍTULO 37 – Respostas de cultivares de trigo a diferentes doses de adubação nitrogenada em cobertura 507
Érika Nunes Macedo; Dienifer Weirich Lopes; João Gabriel F. Peixoto; Lorenzo I. da Silveira; Wellington da Silva; Giovani Zabot; Marcus Vinícius Tres; Alberto E. Knies.

CAPÍTULO 38 – Agricultura digital e agrometeorologia de precisão no manejo da ferrugem asiática da soja: avaliação da eficiência econômica 520
Laura Beatriz Schott; Luiz Felipe S. Pavão; Emanoel Rolim de Farias; André Müllich; Jaqueline Sgarbossa; Luciano Z. Pes; Ivan Carlos Maldaner; Marcelo Silveira Farias.

CAPÍTULO 39 – Desempenho de cultivares de soja em resposta à irrigação suplementar 530
João Gabriel Fortes Peixoto; Dienifer W. Lopes; Erika N. Macedo; Wellington da Silva; Richard Massirer Prochnow; Marcus Vinícius Tres; Giovani Zabot; Alberto E. Knies.

CAPÍTULO 40 – Desempenho agronômico de soja em ambientes de alta e baixa condutividade elétrica aparente (CEA) sob taxa variável de sementes 542
Leticia Bertote Belarmino; Luiz Felipe S. Pavão; André Müllich; Andrei Pezzini Holdefer; Ivan Carlos Maldaner; Luciano Z. Pes; Jaqueline Sgarbossa; Marcelo S. de Farias.

CAPÍTULO 41 – Geração de zonas de manejo a partir da correlação entre teores de argila e da condutividade elétrica do solo 554
Murillo Rodrigues Dias; Fernanda Facco Cechin; André Müllich; Luiz Felipe Silveira Pavão; Ivan C. Maldaner; Marcelo S. Farias; Luciano Z. Pes; Jaqueline Sgarbossa.

CAPÍTULO 42 – Impacto da velocidade de semeadura na plantabilidade da soja 568
Sabrina Tolotti Peruzzo; Gabriel Isaque Kampff; Luis Paulo Baldissera Shorr; Laina Vitória Grasseli, Eliége Lampert, João Miguel Taufer Alves, Matheus Gnoatto.

CAPÍTULO 43 – Efeitos agronômicos e econômicos da aplicação em taxa variável em comparação à taxa fixa de corretivos e fertilizantes 579
André Müllich; Luiz Felipe Silveira Pavão; Ivan Carlos Maldaner; Marcelo Silveira de Farias; Luciano Zucuni Pes; Jaqueline Sgarbossa.

CAPÍTULO 44 – Integração de variáveis topográficas, produtividade e fertilidade para delimitação de zonas de manejo em lavoura 590
Silmar Mateus Dallabrida; Jean Michel Moura-Bueno; Bruna Trevizan Paese; Marco Ivan Rodrigues Sampaio; Maísa Jungbeck.

SEÇÃO 3 – ÁREA TEMÁTICA: GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À AGRICULTURA DE PRECISÃO 606

CAPÍTULO 45 – Correlação entre índices de vegetação e teor de clorofila em plantio de *Eucalyptus saligna* sm sob condição de estresse abiótico 607
Sally Deborah Pereira da Silva; Lúcio de Paula Amaral; Gustavo Vedooto Ferreira; Regiane Aparecida Ferreira; Norton Borges Junior; Telmo Jorge Carneiro Amado.

CAPÍTULO 46 – Análise espacial da distribuição longitudinal de plantas de feijão utilizando dosador com sistema de esteira condutora de sementes eletricamente atuada 620
João Batista da Silva Santos; José Carlos C. Reis; Mateus Santos Ribeiro; Lúcio de Paula Amaral; Vinicius Kaster Marine; Eduardo Leonel Bottega; Igor Madruga.

CAPÍTULO 47 – Correlação geoespacial da resistência do solo à penetração e da produtividade da soja 634
Gustavo Bock Bernhard; Eduardo Leonel Bottega; Zanandra Boff de Oliveira; Endiele Lopes dos Santos; Guilherme Weber Bourscheid; Lúcio de Paula Amaral; Carlos Eduardo da Silva; Pedro Eduardo Fischer Boeno.

CAPÍTULO 48 – Sensoriamento proximal na cultura da macieira (*malus domestica* borkh.) para estabelecimento da correlação entre vigor vegetativo e ndvi 646
Jardel Talamini de Abreu; Luciano Gebler; Eduardo Antônio Speranza; Alan C. Bressan.

CAPÍTULO 49 – Relação entre condutividade elétrica aparente do solo, componentes de rendimento e produtividade da soja: uma análise espacial 660
Régis Ruoso; Eduardo Leonel Bottega; Zanandra Boff de Oliveira; Fernando Coelho Eugenio; Mirta Teresinha Petry; Gustavo Bock Bernhard; Juliano Dalcin Martins.

CAPÍTULO 50 – Análise da densidade de gotas por pulverização aérea com aeronave remotamente pilotada em videira 675
Lillian Espindola Müller; Christian Bredemeier; Fabio R. Cavalcanti; Ana Julia T. Soares; Bárbara da S. Nogueira; Teresa Enderle; Márcio A. Fusiger; Gabriel M. Maggioni.

CAPÍTULO 51 – Implicações da calibração radiométrica em índices de vegetação para avaliação da sanidade em *Eucalyptus saligna* SM. 688
Sally Deborah Pereira da Silva; Lúcio de Paula Amaral; Gustavo Vedooto Ferreira; Regiane Aparecida Ferreira; Norton Borges Junior; Telmo Jorge Carneiro Amado.

CAPÍTULO 52 – Impacto da calibração radiométrica em imagens multiespectrais do sensor Parrot Sequoia® em arroz irrigado 702
Sally Deborah Pereira da Silva; Álisson Pacheco Sperandei; Vinicius Ritcher; Roberta Aparecida Fantinel; Lúcio de Paula Amaral; Rudiney S. Pereira; Fernando C. Eugenio.

CAPÍTULO 53 – Qualidade fisiológica de sementes de nabo e ervilhaca semeados com drone 716
Luís Felipe Albarello; Gilvan Moisés Bertollo; Henrique Thomazi Bueno; Ezequiel Zibetti Fornari; Stela Maris Kulczynski; Nicolas P. Cabral; Renan Mariotti; Guilherme N. Farias.

CAPÍTULO 54 – Fluxo geoestatístico automatizado para mapeamento de produtividade de soja: validação k-fold e análise de sensibilidade de modelos variográficos 726
Carlos Alberto Rigo Junior; Daiane Luisa Rosso; Lúcio de Paula Amaral.

CAPÍTULO 55 – Diagnóstico do monitoramento das perdas na colheita da soja no Paraná – safra 2024/2025 742
Anderson de Toledo; Hevandro Colonhese Delalibera; Edivan José Possamai.

CAPÍTULO 56 – Relação de índices de vegetação com a produtividade de milho em áreas irrigadas no rio grande do sul 756
Núbia Pentiado Aires; María Silvia Pardi Lacruz; Amanda Avozani; Jocélia Rosa da Silva; Robson Giacomeli.

CAPÍTULO 57 – Comparação de métodos de calibração radiométrica na estimativa do índice de vegetação MPRI com drone Mavic 3M 769
Frederico R. de Castro; João Batista da S. Santos; Luise J. Pedó; Lúcio de P. Amaral; Victor Hugo L. Velazco; Wagner N. Macedo; Gerson dos S. Lisboa; Emanuel A. Silva.

CAPÍTULO 58 – Adubação potássica com base na variabilidade espacial: estratégias para uma agricultura sustentável 779
Amanda Trentin Moro; Antônio Luis Santi; Amanda Fornari; Renan da Rosa; Brenda Giovanna Binotto Brandt; Willian José Junges; Igor Cotica Gnoatto; André F. de Conti.

CAPÍTULO 59 – Variabilidade espacial do pH do solo e a relação com a saturação de bases 788
Artur Cidade dos Santos; Luciano Z. Pes; Lúcio de P. Amaral; Wagner N. Macedo

CAPÍTULO 60 – Influência da época de semadura na correlação da produtividade do milho com o índice NDVI 798
Gabriel Kaefer Seganfredo; Luis Gustavo Kern; André Müllich; Luiz Felipe Silveira Pavão; Marcelo S. Farias; Luciano Zucuni Pes; Ivan C. Maldaner; Jaqueline Sgarbossa

CAPÍTULO 61 – Aplicação de tecnologias digitais Agrocad® e T3rra Cutta© na sistematização e avaliação de taipas 809
Mônica Noal; André Müllich; Luiz Felipe Silveira Pavão; Ivan Carlos Maldaner; Marcelo Silveira de Farias; Luciano Zucuni Pes; Jaqueline Sgarbossa.

CAPÍTULO 62 – Comparação entre projetos de linhas para a operação de semeadura em um talhão agrícola 819
Guilherme Bortolotto da Silva; Vitor Cargnin Pegoraro; Luiz Felipe Silveira Pavão; André Müllich; Ivan C. Maldaner; Marcelo S. de Farias; Luciano Z. Pes; Jaqueline Sgarbossa.

CAPÍTULO 63 – Índices de vegetação e sua correlação com a produtividade da cultura da soja: um estudo sobre NDVI e NDRE 829
Luis Paulo Baldissera Schorr; Diego D. da Silveira; Tarik Cuchi; Sabrina T. Peruzzo; Francisco G. Magro; João Miguel T. Alves; Laína V. Grasselli; Matheus Gnoatto.

CAPÍTULO 64 – Correlação entre índices espectrais e a produtividade da soja em diferentes estádios fenológicos 839
Laura da Silva Camargo; Luiz Gustavo Kern; André Müllich; Luiz Felipe Silveira Pavão; Marcelo S. Farias; Luciano Z. Pes; Ivan C. Maldaner; Jaqueline Sgarbossa.

CAPÍTULO 65 – Correlação entre os índices de vegetação (NDVI e IOP) para o monitoramento do dossel vegetativo do trigo 849
Thiago Santos Cocco; Anna Elisa Gatelli; Thauhana Kuhn; Márcio Gabriel Motke Wrubleski; Luís Felipe Rossetto Gerlach; André Luis Vian; Christian Bredemeier.

CAPÍTULO 66 – Índices espectrais de vegetação relacionados ao manejo da cultura do trigo 863
Lúcio de P. Amaral; Cristiano C. da Silva; Luís Felipe Rech; Nádia M. Mucha; Bruna T. Paese; Mateus S. Ribeiro; Paulo E. Baccin; Alexandre C. Bueno.

CAPÍTULO 67 – Imageamento com drones e modelagem topográfica para simular áreas potenciais de erosão hídrica em lavouras 876
Vitor Cargnin Pegoraro; Guilherme Bortolotto da Silva; André Müllich; Luiz Felipe S. Pavão; Luciano Z. Pes; Marcelo S. de Farias; Ivan C. Maldaner; Jaqueline Sgarbossa.

CAPÍTULO 68 – CRIAÇÃO DE UM BANCO DE DADOS DE IMAGENS DE FRUTAS DE MAÇÃ GALA PARA O BRASIL 889
Alessandra Soares Sessi; Alessandro Fernando M. Franco; Eduardo Carvalho da Silva; Lucas de Ross Marchioretto; Jovania M. Dias; Silvio Andre M. Alves; Luciano Gebler.

SEÇÃO 4 – ÁREA TEMÁTICA: MÁQUINAS AGRÍCOLAS DESENVOLVIDAS PARA AGRICULTURA DE PRECISÃO 897

CAPÍTULO 69 – A semente como fator de influência na singulação 898
João Batista da Silva Santos; Vinicius Kaster Marini; Marconi Ribeiro Furtado.

CAPÍTULO 70 – Estrutura de funções e identificação de requisitos para o projeto de um sistema de condução de sementes em precisão para altas velocidades 908
João Batista da Silva Santos; Vinicius Kaster Marini.

CAPÍTULO 71 – Qualidade de aplicação de calda na cultura da soja com uso de pingentes 926
Gilvan Moisés Bertollo; Marcelo Luis Seibert; Nícolas Panciera Cabral; Renan Mariotti; Mateus Piovesan; Luis Felipe Albarello; Guilherme Natalli Farias; Antônio Luis Santi.

CAPÍTULO 72 – Efeitos da dessecação pré-colheita na perda de colheita e na qualidade fisiológica de sementes de soja 935

Renan Mariotti; Gilvan Moisés Bertollo; Marcelo Luiz Seibert; Stela Mariz Kulczynski; Luís Albarello; Nícolas Panciera Cabral; Matheus Piovezan; Luiz Henrique B. Velho

CAPÍTULO 73 – Eficiência da aplicação de fungicidas com pingentes na cultura da soja com o uso de sensoriamento remoto 950

Nícolas Panciera Cabral; Gilvan Moisés Bertollo; Marcelo Luiz Seibert; Emanuel Araujo Silva; Luís Albarello; Renan Mariot; Matheus Piovesan; Guilherme Natalli Farias.

CAPÍTULO 74 – Avaliação de permeâmetros de poço para a aquisição de dados de condutividade hidráulica do solo saturado 963

Catia Bertollo Chaves; Alejandro David Chuquimia Quicaña; Luísa Ceresoli Chimello; Michael Mazurana; Getulio Coutinho Figueiredo.

CAPÍTULO 75 – Avaliação das perdas de grãos na colheita da cultura da soja 972

Dienifer Wieirich Lopes; Rodrigo Marcuzzo Motta; João Gabriel Fortes Peixoto; Érika N. Macedo; Lorenzo I. da Silveira; Taís G. Pinto; Eduardo L. Bottega; Alberto E. Knies.

CAPÍTULO 76 – Agricultura digital no manejo de pragas: comparação entre aplicações localizadas e em área total na soja 986

Gabrielle Bortolotti; Luana Lüdtke; Luiz Felipe Silveira Pavão; André Müllich; Caetana Nemitz; Ivan Carlos Maldaner; Marcelo Silveira de Farias; Luciano Zucuni Pes.

CAPÍTULO 77 – Desempenho operacional e econômico de máquinas e implementos de pulverização agrícola 996

Luis Paulo B. Schorr; Igor Luis Muller; Sabrina Tolotti Peruzzo; Daniela Priori Pereira; João Miguel T. Alves; Laína Vitória Grasselli; Juhan Vitor A. Pedon; Eliége Lampert.

CAPÍTULO 78 – Quantificação do fluxo de fertilizantes sólidos com o uso de um sensor não intrusivo 1005

Rafael Sobroza Becker; Airton dos Santos Alonço; Tiago Rodrigo Francetto.

CAPÍTULO 79 – Avaliação da aplicação de sólidos com drone em diferentes alturas e velocidades de voo 1020

Vanessa Pereira de F. Silva; João Gabriel F. Peixoto; Raissa Wolffenbüttel; Érika B. Feron; Richard M. Prochnow; Wellington da Silva; Eduardo L. Bottega; Alberto E. Knies.

CAPÍTULO 80 – Integração de sensores embarcados, plataformas digitais e ciência de dados na análise espacial da produtividade agrícola 1031

Igor Drescher; Larissa Meira; André Müllich; Luiz Felipe Silveira Pavão; Marcelo S. Farias; Luciano Z. Pes; Ivan C. Maldaner; Luiz Patric Kayser.

CAPÍTULO 81 – Desempenho de semeadora-adubadora de precisão variando a densidade de sementes 1041

Luiz Felipe Silveira Pavão; André Müllich; Andrei Pezzini Holdefer; Marcos Paulo P. Ribeiro; Marcelo S. de Farias; Ivan C. Maldaner; Luciano Z. Pes; Jaqueline Sgarbossa.

SEÇÃO 5 – ÁREA TEMÁTICA: DESCRIÇÃO DE CASO TÉCNICO E/OU RELATO DE EXPERIÊNCIA 1052

CAPÍTULO 82 – Uso de aeronave remotamente pilotada no controle biológico de *Thaumastocoris peregrinus* 1053
Norton Borges Junior; Lúcio de Paula Amaral; Leonardo Rodrigues Barbosa; Vagner dos Santos Machado; Franciele da Silveira Gomes; Flaiane Catarine da Rosa; Franco Freitas Quevedo; Adriano Arrué Melo.

CAPÍTULO 83 – Uso de VANT na avaliação de sobrevivência de mudas de Eucalyptus sp. 1063
Norton Borges Junior; Lúcio de Paula Amaral; Igor G. L. M. V. de Souza; Denis Santos da Silveira; Flaiane Catarine da Rosa; Franco Freitas Quevedo; Adriano Arrué Melo; Vagner dos Santos Machado.

CAPÍTULO 84 – Integração de tecnologias digitais na agricultura regenerativa: impactos econômicos e ambientais no Cerrado Mato-Grossense 1070
Natália de Souza Nunes; Matheus Monteiro Valero.

CAPÍTULO 85 – Desenvolvimento de um software para aplicação em taxa variada de nitrogênio: um estudo de caso técnico para adubação nitrogenada em trigo 1079
Márcio Gabriel Mötke Wrubleski; Thauhana Cássia Gasparotto Kuhn; Teresa Enderle; Thiago Santos Cocco; André Luis Vian; Christian Bredemeier; João Leonardo F. Pires.

CAPÍTULO 86 – Uso de ferramentas de monitoramento remoto na zootecnia de precisão 1088
Ana Lívia dos S. Ribeiro; Ana Carolina M. Rodrigues; Luiz Felipe S. Pavão; André Müllich; Jaqueline Sgarbossa; Luciano Z. Pes; Vanessa B. Rosa; Diego Zeni.

CAPÍTULO 87 – Uso de índices de vegetação e imagem termal em *Eucalyptus robusta* após incidência de geadas 1097
Pedro Lopes Trevisan; Hendrick da Costa de Souza; Lúcio de Paula Amaral; Ezequiel Gasparin; Henrique Araujo Barichello; Micheli Reis da Rocha; Maria Isabel Borelli Teixeira; João Batista Cassol Ferreira; Gustavo Ferreira Vedooto.

CAPÍTULO 88 – Uso de RPA com lidar H800 para inventário florestal de eucalipto no Sul do Brasil 1111
Guilherme Coelho de Pellegrini; Lúcio de Paula Amaral; Gustavo Vedooto; Gessieli Possebom; Thales Augusto Ulrich; Rafael Rocha Ribeiro; Ciro Giusti Galiano; Maria Fernanda Kunz Stangarlin.

BIOGRAFIA RESUMIDA DOS AUTORES 1121

ISBN 978-65-990392-6-3



TRABALHOS PREMIADOS NO 7º CONGRESSO APSUL AMÉRICA 2025

PREMIAÇÃO DOS MELHORES TRABALHOS NO 7º APSUL AMÉRICA 2025

Lúcio de Paula Amaral[1, 2, 3]; Zanandra Boff de Oliveira[1]; Eduardo Leonel Bottega[1]; Telmo Jorge Carneiro Amado[1, 2]; Teodora Lütkemeyer[2]

[1] Revisores e avaliadores de trabalhos para o 7º Congresso APSUL AMÉRICA
[2] Coordenação Geral do 7º Congresso APSUL AMÉRICA
[3] Organização do 4º E-Book para o 7º Congresso APSUL AMÉRICA

Desde a primeira edição do Congresso Sul-Americano de Agricultura de Precisão e Máquinas Precisas – APSUL AMÉRICA, ocorrida em 2011, tradicionalmente realizado no município de Não-Me-Toque, RS – A Capital Nacional da Agricultura de Precisão, ocorre a apresentação de trabalhos na forma de poster, também realizada na atual edição em 2025 (7º APSUL AMÉRICA).

A partir da quarta edição do APSUL AMÉRICA iniciou-se a elaboração de um E-Book (Livro Digital) contendo os trabalhos completos, aprovados e apresentados no congresso, estruturados na forma de capítulos de livro. Essa ação é objetiva divulgar, a toda sociedade interessada, trabalhos apresentados no evento. Estes trabalhos refletem as pesquisas e ações realizadas por diferentes entes, sobre Agricultura de Precisão e Digital, no Brasil e na América do Sul. O lançamento do E-book do APSUL AMÉRICA ocorre na EXPODIRETO do ano subsequente à realização do congresso.

Os trabalhos são revisados e avaliados pelo Comitê Científico do APSUL AMÉRICA, composto por professores e pós-graduandos de diversas universidades, também por profissionais que atuam no mercado e possuem expertise em Agricultura de Precisão e temas correlacionados, abordados nos trabalhos de pesquisas, descrição de caso técnico, relato de experiencia e também nas apresentações dos painéis e minicursos realizados no congresso. Para o 7º Congresso APSUL AMÉRICA o Comitê Científico contou com a participação de 78 revisores e avaliadores.

O revisores estavam distribuídos em 12 Instituições de Ensino Superior (UFSM, UFRGS, UNICRUZ, URI, UFN, UERGS, IFFAR, UFES, UFG, UFSB, UFVJM e Universidade do Texas), 16 empresas e 2 cooperativas (COTRIJAL, STARA, ROJ, FARM 360, SLC Máquinas, CARGIL, J.ASSY, TELUS AGRICULTURE, GDM, COAMO, AGROSER CASE IH, ALLIANZA, Telechea Agroambiental, Vinícola Velho Amâncio, DALLFRIGO, AGROURBIS e AGROGERENCIAL), três instituições públicas (EMBRAPA, DPRF/MJ, SMMA/PMSM) e quatro participantes representando outras categorias (consultor e produtor rural), dentre outros. Com relação ao PPGAP/UFSM participaram do Comitê Científico do APSUL AMÉRICA, 15 discentes (mestrandos em Agricultura de Precisão), 15 docentes permanentes, 2 docentes colaboradores e 10 egressos do curso de Mestrado Profissional em Agricultura de Precisão.

Os trabalhos são organizados em quatro linhas temáticas, estabelecidas com base nas três Linhas de Pesquisas desenvolvidas no Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão da Universidade Federal de Santa Maria – PPGAP/UFSM,



referência estabelecida no programa para organizar os trabalhos de pesquisas, aqui também adotadas, sendo elas:

- Manejo de Sítio específico de solo e planta;
- Geotecnologias Aplicadas à agricultura de Precisão;
- Máquinas Agrícolas Desenvolvidas para Agricultura de Precisão;
- Descrição de Caso Técnico e Relato de Experiência em Agricultura de Precisão.

O PPGAP/UFSM possui o curso de Mestrado Profissional em Agricultura de Precisão da UFSM, sediado no Colégio Politécnico da UFSM. Estas linhas de pesquisa estão ativas e em funcionamento no referido curso, orientando as diversas dissertações defendidas no programa. O Mestrado Profissional em Agricultura de Precisão da UFSM foi criado em 2010, com autorização da CAPES e Nota/Conceito 4 (para o limite máximo de nota 5 para programas que possuem curso de mestrado), entrou em funcionamento em 2011 e completa em 2026 15 anos de existência. Em janeiro de 2026 o PPGAP/UFSM recebeu da CAPES a Nota/Conceito máximos, passando de 4, nota que o programa vinha mantendo desde a sua criação, para 5, atestando sua qualidade e excelência. Esse resultado se deve a uma série de ações, desenvolvidas em vários anos, destacando como relevante contribuição a realização do Congresso APSUL AMÉRICA, do qual o PPGAP/UFSM e o Mestrado Profissional em Agricultura de Precisão participam ativamente do planejamento, organização e realização, desde sua primeira edição.

Foram recebidos mais de 90 manuscritos de trabalhos para serem avaliados pelo Comitê Científico, com participação de 262 autores, envolvendo várias instituições. Destes, foram aprovados 89 trabalhos, para serem apresentados na forma de poster no evento e publicados na íntegra como capítulos de livro no E-Book do 7º APSUL AMÉRICA, em 2026. Dentre os trabalhos aprovados e apresentados no evento, foi selecionado um trabalho por temática para ser premiado e receber uma menção honrosa no 7º Congresso APSUL AMÉRICA 2025.

A Comissão Julgadora foi composta pelos revisores *Ad Hoc* e avaliadores de apresentações de trabalhos no evento Professores da UFSM, Doutores Zanandra Boff de Oliveira, Eduardo Leonel Bottega, Lúcio de Paula Amaral e Telmo Jorge Carneiro Amado. A Comissão Julgadora reportou o resultado da seleção para a Presidente do APSUL AMÉRICA Sra. Teodora Lütkemeyer, representando a Coordenação Geral e Organização do evento. Foram então premiados no dia 23 de setembro de 2025 os seguintes trabalhos por temática descritos abaixo, com entrega de certificados e presentes aos autores.

• Manejo de Sítio Específico de Solo e Planta:
Recomendação de taxa variada de sementes de soja em diferentes zonas de manejo – smartgrid Grupo Don Mario, autoria de Luan Pierre Pott, Maximiliano Sabino, Raí Schwalbert, Junior Sandri, Weslei Graffunder, Mariany Domingues, Marcelo Suk. Grupo Don Mario (GDM);

• Geotecnologias Aplicadas à agricultura de Precisão:
Modeling maize yield using artificial neural networks integrating vegetation indices and environmental variables, autoria de Amanda Avozani, Lúcio de Paula Amaral, Luiz Patric Kayser, Telmo Jorge Carneiro



Amado, Felipe Guadagnini Leite, Luciano Zucuni Pes. Universidade do Texas e Universidade Federal de Santa Maria;

- Máquinas Agrícolas Desenvolvidas para Agricultura de Precisão:

Semeadura de precisão: estado da arte e tendências para o futuro, de autoria de João Batista da Silva Santos e Vinicius Kaster Marini. J.ASSY e Universidade Federal de Santa Maria.

- Descrição de Caso Técnico e Relato de Experiência em Agricultura de Precisão:

Agricultura de precisão na argentina: da incorporação de tecnologia à gestão estratégica de dados, autoria de Fernando Scaramuzza. Asesor – Consultor privado en Agricultura de precisión y mecanización agrícola na Argentina.

Na Seção de Apresentação de Trabalhos Técnico-Científicos, realizada dia 24 de setembro de 2026, houveram 86 apresentações, contando com os trabalhos premiados. Os autores elegeram um apresentador que foi sabatinado pelos Avaliadores de trabalhos do APSUL. A Coordenação Geral e a Organização do 7º Congresso APSUL AMÉRICA destacaram, com entusiasmo, o número de trabalhos apresentados, que foi aproximadamente o dobro em relação ao 6º APSUL AMÉRICA de 2023, quando foram apresentados 47 trabalhos.

Nas palavras da Presidente do 7º Congresso APSUL AMÉRICO, Sra. Teodora Lütkemeyer – “Saudamos os trabalhos premiados e valorizamos a todos que enviaram suas pesquisas para o congresso. O grande número de artigos enviados para o APSUL América mostra a importância do evento para o agronegócio.”. Os trabalhos premiados podem ser conferidos na integra a seguir.



ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 1

RECOMENDAÇÃO DE TAXA VARIADA DE SEMENTES DE SOJA EM DIFERENTES ZONAS DE MANEJO – SMARTGRID GRUPO DON MARIO

Recommendation of soybean seed rate in different management zones – SmartGrid Grupo Don Mario

Luan Pierre Pott[1]; Maximiliano Sabino[1]; Raí Schwalbert[1]; Junior Sandri[1]; Weslei Graffunder[1]; Mariany Domingues[1]; Marcelo Suk[1]

[1] Grupo Don Mario (GDM), Avenida Selma Parada, 505, CEP 13.091-605, Jardim Madalena, Campinas - SP, Brasil, lpott@gdmseeds.com

RESUMO

A soja é uma das principais culturas agrícolas do Brasil, demandando práticas que aumentem sua produtividade de forma eficiente e sustentável. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da densidade de semeadura em diferentes zonas de manejo (ZM), comparando a recomendação tradicional do produtor com uma recomendação técnica baseada em modelagem de dados da empresa de genética Grupo Don Mario (GDM). Para isso, foram realizados experimentos com grids contendo quatro densidades de semeadura e três repetições. Os resultados indicaram que a densidade ideal varia conforme a ZM, sendo que a recomendação técnica da GDM proporcionou maior eficiência produtiva com incremento médio de 46 kg ha^{-1} (15 - 470 kg ha^{-1}) e econômico em média de R$ 71 ha^{-1} (R$ 22 – 980 ha^{-1}) para os casos positivos. Os grids com diferentes populações de plantas proporcionaram dados robustos para refinar as recomendações técnicas da GDM. Conclui-se que taxa variável de semeadura, apoiado por modelagem e dados espaciais é uma estratégia eficaz para otimizar a produção da soja.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. Taxa variada de sementes. Modelos de densidade de plantas.

ABSTRACT

Soybean is one of the main agricultural crops in Brazil, requiring practices that increase productivity efficiently and sustainably. The objective of this study was to evaluate the effect of planting density in different management zones (MZ), comparing the traditional farmer's recommendation with a technical recommendation based on data modeling from the genetics company Grupo Don Mario (GDM). Experiments were conducted using grids with four seeding densities and three replications. The results indicated that the ideal density varies by MZ, with the GDM technical recommendation providing greater productive efficiency, with an average yield increase of 46 kg ha^{-1} (ranging from 15 to 470 kg ha^{-1}), and an economic gain averaging R$ 71 ha^{-1} (ranging from R$ 22 to R$ 980 ha^{-1}) in the favorable cases. The grids with different plant populations generated robust data to refine GDM's technical recommendations. It is concluded that variable-rate seeding, supported by modeling and spatial data is an effective strategy to optimize soybean production.

Keywords: Precision agriculture. Variable seeding rate. Planting density models.



ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

A relevância da cultura da soja (*Glycine max* (L) Merrill) como principal *commodity* agrícola do Brasil reforça a demanda contínua por inovações que elevem sua produtividade com eficiência e sustentabilidade. Nos últimos anos, a agricultura de precisão tem se consolidado como um caminho promissor para alcançar esses objetivos, ao integrar sensores, GPS, mapas de produtividade e modelagem espacial com o intuito de adaptar o manejo às variabilidades internas dos talhões (ZANDONADI et al., 2019). Nesse cenário, a densidade de semeadura, um dos principais fatores agronômicos ajustáveis, tem despertado particular atenção por seu impacto direto nos componentes do rendimento e na rentabilidade da safra (CORASSA et al., 2018; FRANCHINI et al., 2020).

Estudos realizados no Sul do Brasil evidenciam que a resposta da produtividade à densidade de semeadura na soja é altamente dependente do potencial produtivo do ambiente. Corassa et al. (2018) mostraram que, ambientes de alto rendimento permitiram uma redução de até 18% na densidade de semeadura sem prejuízo de produtividade, reforçando a necessidade de recomendação localizada. Complementando essa perspectiva, o estudo de Coelho et al. (2023), conduzido em Londrina, Paraná, revela que a uniformidade espacial na distribuição de sementes resultou em acréscimo na produtividade e aumento na rentabilidade.

No âmbito nacional, estudos agronômicos têm aprofundado o entendimento sobre os efeitos da densidade e do arranjo espacial na arquitetura da planta e no desempenho produtivo. Oliveira, Knies e Wolffenbüttel (2022) observaram que, a recomendação de densidade é influenciada pela cultivar bem como com o ambiente e condição de estabelecimento da cultura. Machado et al. (2023), por sua vez, encontraram respondência positiva da produtividade ao aumento da densidade em sistemas irrigados, especialmente nas cultivares. De forma semelhante, Tagliapietra et al. (2022) estimaram uma densidade agronômica ótima média de 29 plantas m^{-2} destacando que cada planta a menos por metro quadrado resultou em perda de produtividade de 59 a 78 kg ha^{-1}, conforme o ciclo da cultivar.

Paralelamente aos ajustes na densidade, a adoção de tecnologias de semeadura de taxa variável (VRS – Variable Rate Seeding) tem demonstrado ser uma estratégia eficaz para adequar a densidade à fertilidade espacial do solo. Estudo conduzido por da Silva et al. (2022) evidenciou que integrar atributos como condutividade elétrica aparente e teor de argila para modular a densidade populacional resultou em melhor desempenho produtivo.

Essas evidências coletivas ressaltam tanto o potencial produtivo das lavouras quanto o valor agregado do manejo preciso e adaptado. Contudo, apesar dos avanços tecnológicos, a adoção ampla da agricultura de precisão no Brasil ainda esbarra em obstáculos como custos elevados dos equipamentos e carência de capacitação técnica por parte dos produtores, o que reforça a importância de estudos aplicados que demonstrem os benefícios econômicos e operacionais das tecnologias.

Hipóteses: (i) As densidades recomendadas pela GDM proporcionarão produtividades iguais ou superiores às densidades convencionais do produtor, e (ii) os modelos desenvolvidos permitirão refinar as recomendações de densidade de semeadura, aumentando a eficiência agronômica e econômica.

Assim, os objetivos deste trabalho propõem-se a comparar a geração de valor da recomendação técnica de densidade populacional da soja do Grupo Don Mario (GDM), frente a recomendações convencionais do produtor. Segundo objetivo é a

ISBN 978-65-990392-6-3

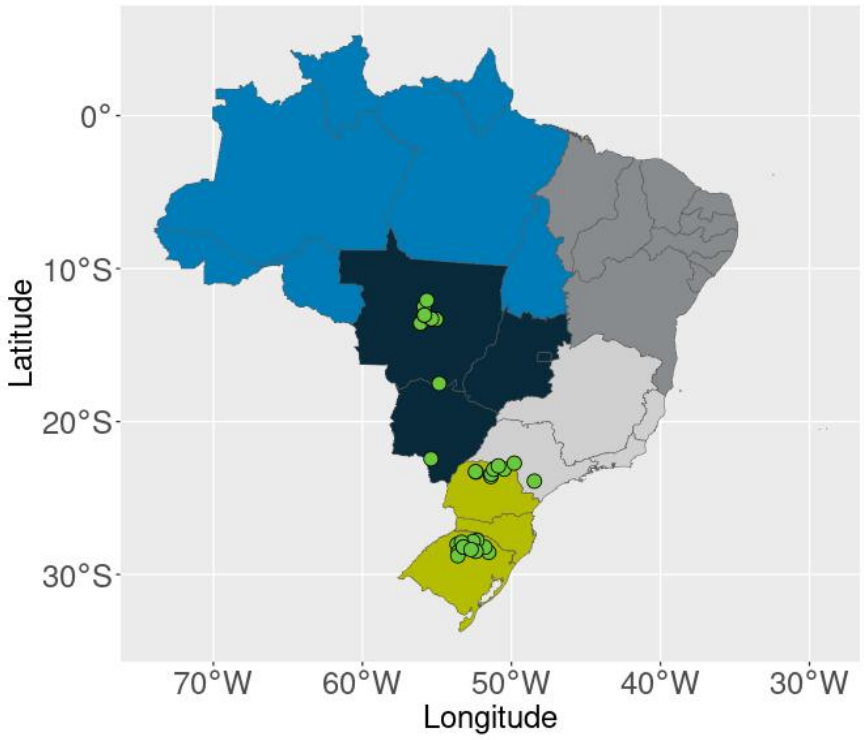
geração de dados para construir modelos de resposta da cultivar à densidade populacional baseados em dados de diferentes locais e zonas de manejo (ZM), com vistas à elaboração de recomendações mais precisas e adaptadas às particularidades do ambiente local (solo, clima, cultivar).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em cinco diferentes estados do Brasil, Rio Grande do Sul (RS), Paraná (PR), São Paulo (SP), Mato Grosso do Sul (MS), e Mato Grosso (MT), na safra 2024-2025, estados onde a cultura da soja é amplamente produzida. Os locais da condução dos trabalhos do projeto estão geograficamente localizados na Figura 1.

Figura 1 – Distribuição geográficas dos locais da condução dos trabalhos através das Macroregiões sojícolas.



Legenda: Estados do Brasil e círculos em verde referem-se aos locais de trabalho com SmartGrid.
Fonte: Autores (2025)

2.2 SmartGrid

Os ensaios, aqui denominados SmartGrid, fazem parte de um projeto global intuito de quantificar o impacto de práticas de manejo variável nas principais regiões produtoras de soja do mundo, usando o germoplasma da empresa GDM. Cada SmartGrid é composto por dois elementos, i) faixas posicionadas de maneira

transversal a disposição da ZM com o objetivo de comparar recomendação técnica da GDM x convencional do produtor e ii) parcelas aleatorizadas dentro de cada ZM com a finalidade de gerar a curva de resposta de produtividade de soja em função da densidade, específica para cada ZM, com o objetivo de seguir validando a hipótese de que resposta de densidade da cultura tem interação significativa com os ambientes de produtividade.

No caso do Brasil de 33 ensaios foram semeados nos 5 diferentes estados, com diferentes datas de semeadura, cultivares e condições hídricas, os quais estão melhor caracterizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização dos *SmartGrid* em cada uma das localidades.

Município	Semeadura	Cultivar	Irrigado
Capão Bonito-SP	07-10-2024	DM54IX57RSF I2X	Sim
André Da Rocha-RS	21-10-2024	BMX VÊNUS CE	Não
Carazinho-RS	11-11-2024	BMX TITANIUM I2X	Não
Carazinho-RS	16-11-2024	BMX TORQUE I2X	Não
Carazinho-RS	04-11-2024	DM54IX57RSF I2X	Não
Carazinho-RS	06-11-2024	BMX TORQUE I2X	Não
Carazinho-RS	17-11-2024	DM60IX64RSF I2X	Não
Caseiros-RS	11-11-2024	BMX ZEUS IPRO	Não
Cruz Alta-RS	04-11-2024	BMX ZEUS IPRO	Não
Erebango-RS	13-11-2024	BMX ZEUS IPRO	Não
Jacutinga-RS	13-11-2024	BMX TITANIUM I2X	Não
Palmeira das Missões-RS	06-11-2024	DM54IX57RSF I2X	Sim
Palmeira das Missões-RS	22-10-2024	NEO560 IPRO	Não
Pejuçara-RS	28-10-2024	DM56i59 IPRO	Não
Quatro Irmãos-RS	12-11-2024	DM59IX61 I2X	Não
Santa Bárbara do Sul-RS	07-11-2024	BMX VÊNUS CE	Não
Santa Bárbara do Sul-RS	18-10-2024	DM56i59 IPRO	Não
Santo Augusto-RS	18-11-2024	DM56i59 IPRO	Sim
Santo Ant. do Planalto-RS	05-11-2024	BMX ZEUS IPRO	Sim
Apucarana-PR	15-10-2024	DM59IX61 I2X	Não
Arapongas-PR	30-10-2024	NEO610 IPRO	Não
Cambé-PR	01-10-2024	DM65IX67RSF I2X	Não
Santa Mariana-PR	17-10-2024	DM66I68RSF IPRO	Não
Sertaneja-PR	31-10-2024	DM66I68RSF IPRO	Não
Ponta Porã-MS	01-10-2024	DM64I63 IPRO	Não
Itiquira-MT	10-11-2024	DM74K75RSF CE	Não
Nova Ubiratã-MT	30-09-2024	BMX SPARTA I2X	Não
Sorriso-MT	10-10-2024	BMX TORMENTA CE	Não
Sorriso-MT	20-10-2024	NEO790 IPRO	Não
Sorriso-MT	23-10-2024	BMX SPARTA I2X	Não
Sorriso-MT	20-09-2024	DM74K75RSF CE	Sim
Sorriso-MT	14-10-2024	NEO790 IPRO	Não
Sorriso-MT	14-10-2024	NEO790 IPRO	Não

Legenda: Macro refere-se à Macroregião sojícola, e irrigado refere-se à irrigação com pivô central.

Fonte: Autores (2025)



ISBN 978-65-990392-6-3

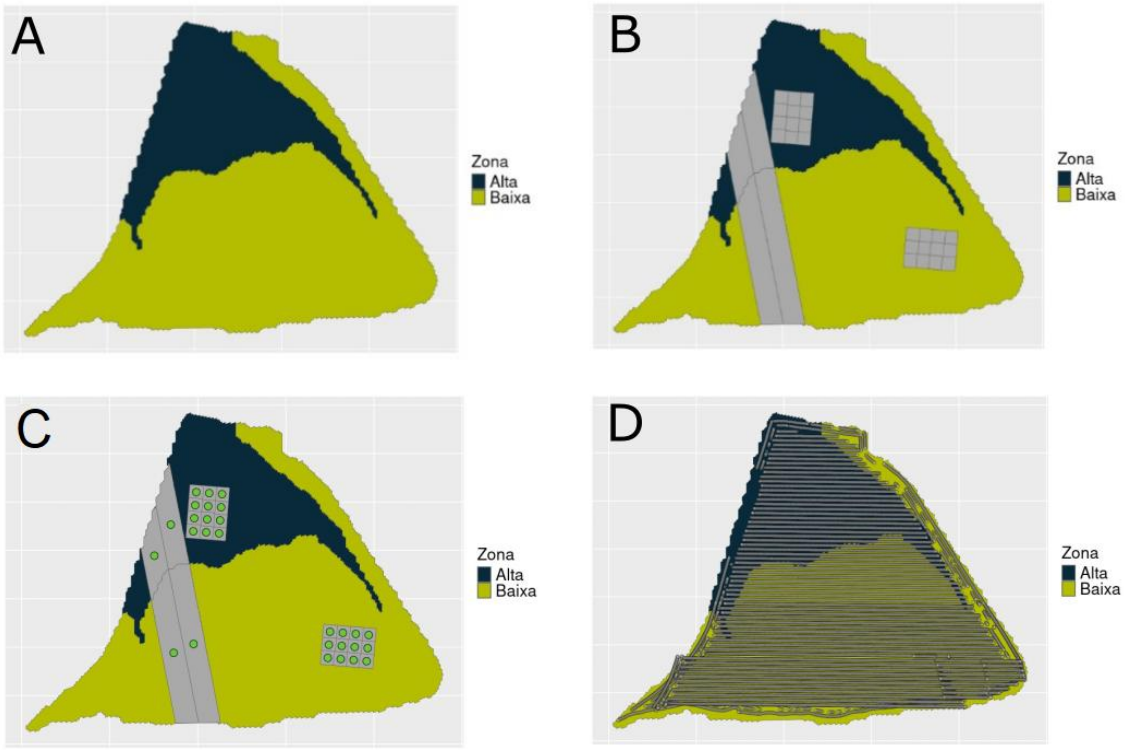
2.3 Zonificação

As zonificações das áreas de estudo foram realizadas com o objetivo de identificar ZM homogêneo, visando à adoção de práticas agrícolas específicas para cada ambiente de produção. Para isso, foram utilizados dados georreferenciados coletados ao longo do ciclo agrícola incluindo: mapas de produtividade de soja e milho – caso produtor tivesse à disposição, imagens multiespectrais de satélite de Sentinel-2 durante os meses de ciclo de cultivos históricos, e altimetria de SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) o qual é um modelo digital global de elevação.

Os dados foram processados e analisados em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software QGIS com o algoritmo k-means para a classificação das ZM. O número ideal de ZM foi determinado por meio do método do cotovelo (Elbow Method) aliado à interpretação agronômica da área. Os mapas resultantes foram validados com base no histórico de produtividade da área e no conhecimento empírico do produtor.

Essa abordagem permitiu a identificação de regiões com comportamentos agronômicos semelhantes, que podem ser manejadas de forma diferenciada, otimizando o uso de insumos e aumentando a eficiência produtiva. Figura 2A demonstra um exemplo de ZM geradas, com a ZM de alta e baixo potencial produtivo de um SmartGrid.

Figura 2 – SmartGrid exemplo com o processo completo de trabalho de agricultura de precisão.



Legenda: (A) Exemplificação de ZM, (B) confecção das prescrições do projeto SmartGrid, (C) pontos de coleta de dados finais de população de plantas, e (D) exemplo dos dados de mapa de colheita para a análise.
Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

Com o objetivo de avaliar o impacto de diferentes estratégias de densidade de semeadura sobre o desempenho da cultura, foram elaboradas prescrições específicas para aplicação em campo, utilizando o formato de arquivos georreferenciados de taxa variável compatíveis com o sistema de aplicação da semeadora como segue Figura 2B.

2.4 Prescrições

2.4.1 Faixas

A área de estudo foi dividida inicialmente em duas faixas principais, cada uma com aproximadamente 30m de largura que passe em diferentes ZM do lote, destinadas à comparação entre duas estratégias distintas de densidade:

- Faixa 1: Densidade de semeadura utilizada pelo produtor, conforme o manejo convencional da propriedade.
- Faixa 2: Densidade variável recomendada por modelo matemático de recomendação da GDM, baseada em critérios técnicos e de posicionamento adaptativos da cultivar utilizada.

Essa divisão teve como objetivo comparar diretamente, em condições reais de campo, o desempenho das duas abordagens de manejo populacional. Ambas as faixas foram posicionadas paralelamente, respeitando a topografia e o histórico de produtividade da área, visando à homogeneidade dos fatores externos.

2.4.2 Grides

Além das faixas comparativas, foram instaladas área experimental em formato de grid, uma em cada ZM com 3 repetições para cada um dos quatro níveis de densidade de semeadura testados: 15, 20, 25 e 35 pl/m².

As unidades experimentais (grids) foram delimitadas em com no mínimo 30x30 e máximo 50x50m, respeitando as condições operacionais da máquina com intuito de poder utilizar os dados de mapa de colheita diretamente.

As prescrições foram elaboradas em *Plugins* de QGIS, exportadas em formato compatível com o sistema de taxa variável da semeadora e aplicadas com controle automático de taxa durante a operação de semeadura.

Esse arranjo experimental permitiu a comparação direta entre as densidades adotadas pelo produtor e pela GDM, além da avaliação da resposta da cultura a diferentes níveis populacionais, fornecendo subsídios técnicos para o ajuste fino das prescrições de semeadura em futuras safras.

2.5 Coleta de dados a campo

A avaliação da população efetiva de plantas foi realizada com o objetivo de verificar a precisão na execução das prescrições de semeadura e analisar o estabelecimento inicial da cultura da soja nas diferentes faixas e grids experimentais.

As contagens foram efetuadas no estádio fenológico V5 da soja proposta por Fehr e Caviness (1977), momento em que a planta já apresenta estabilidade no estande e os danos por falhas de emergência ou mortalidade inicial já estão consolidados.

Para a coleta, foram estabelecidos pontos amostrais georreferenciados dentro de cada faixa e de cada grid experimental, como ilustrado na Figura 2C, respeitando margens de bordadura para evitar efeitos de borda. Em cada ponto, foi medida uma metragem linear de 2m ao longo da linha de semeadura, contabilizando-se o número



total de plantas presentes dentro desse espaço. O software utilizado para a identificação geoespacial bem como o gerenciamento da informação foi o QField, o qual é um aplicativo móvel com conexão direta com o QGis.

Esses dados serviram de base para a corroboração com os resultados de produtividade, eficiência no uso de recursos e resposta das diferentes densidades ao ambiente.

2.6 Mapas de colheita

A obtenção dos dados de produtividade foi realizada durante a operação de colheita da cultura da soja, utilizando colhedoras equipadas com monitor de colheita e Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), como segue Figura 2D.

O monitoramento da colheita capturou informações contínuas sobre produtividade de grãos onde os dados brutos foram exportados do monitor em formato compatível com os softwares de agricultura de precisão utilizados na análise posterior. Antes da utilização dos dados para análise, os mapas foram submetidos a um processo de limpeza e filtragem, a fim de remover dados inconsistentes.

Os mapas finais de produtividade foram posteriormente integrados com as ZM, as prescrições de densidade e os grids experimentais, permitindo a comparação do desempenho da cultura em função das diferentes densidades de plantio testadas.

2.7 Análises

Os dados obtidos nas diferentes etapas do experimento foram organizados, processados e analisados com o objetivo de comparar a produtividade de grãos entre as duas estratégias de manejo populacional aplicadas nas faixas — a densidade recomendada pelo produtor e a recomendada pela GDM. Para isso, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), seguida de teste de comparação de médias, com nível de significância de 5%, visando identificar diferenças estatísticas entre os tratamentos. Além disso, os dados obtidos nas diferentes densidades aplicadas nos grides experimentais, bem como as informações provenientes das ZM, foram utilizados na construção de modelos de resposta da cultivar à densidade populacional. Esses modelos visam embasar futuras recomendações de cultivares GDM adaptadas às condições específicas de cada área produtiva, promovendo a personalização do manejo populacional em função do ambiente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comparativo recomendação GDM x convencional do produtor

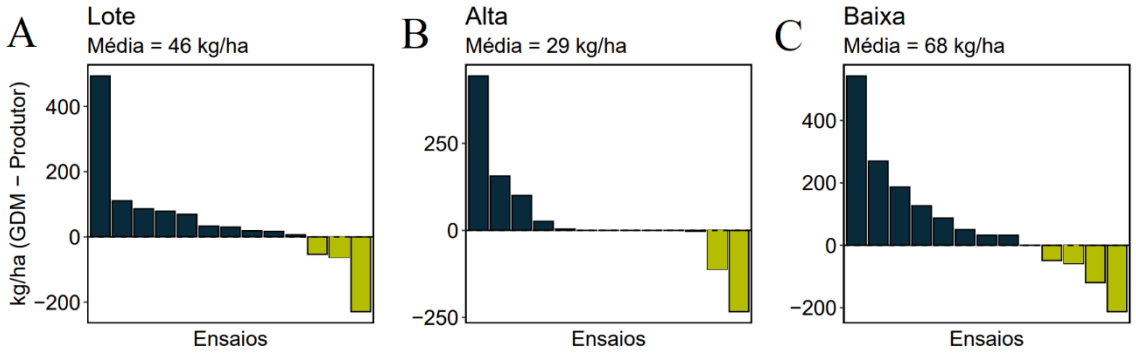
A comparação entre as duas densidades de semeadura aplicadas nas faixas - a recomendação do produtor versus a recomendação da GDM - apresentou variações significativas de produtividade, com 65% dos casos positivos para a recomendação técnica da GDM, obtendo aumento médio de 46 kg ha^{-1} (15 - 470 kg ha^{-1}) na produtividade em comparação à densidade convencional do produtor (Figura 3A), com retorno econômico de R$ 71 ha^{-1} (R$ 22 – 980 ha^{-1}) nos casos de vitória (Figura 4A), evidenciando o potencial de ajuste fino da população de plantas com base em critérios técnicos.

No entanto, a resposta da cultura não foi homogênea ao longo do talhão. Ao segmentar os resultados com base nas ZM, verificou-se que os maiores ganhos de produtividade e retorno econômico com a densidade da GDM ocorreram nas ZM de

ISBN 978-65-990392-6-3

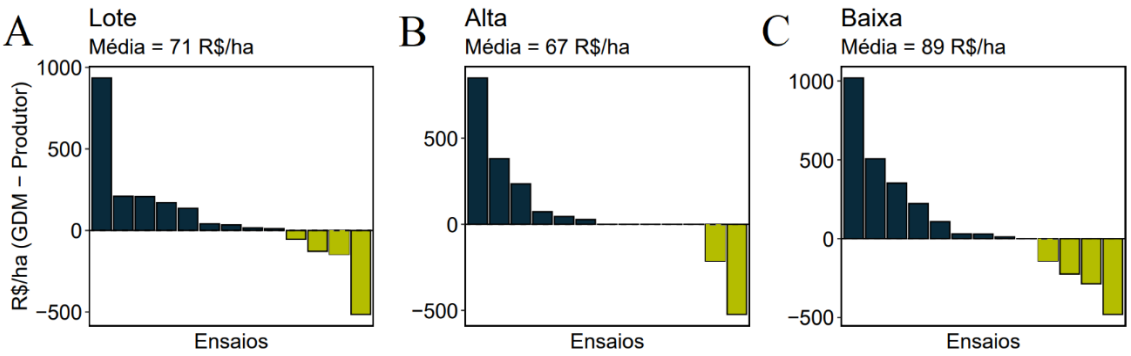
baixa produtividade, onde o ambiente requere populações mais altas. Nessas áreas, o ganho médio foi de 68 kg ha^{-1} (Figura 3C), representando um incremento de R$ 89 ha^{-1} (Figura 4C), em relação à densidade do produtor. Ainda, nas ZM de alta, a densidade da GDM obteve retorno em produtividade de grãos e econômico em relação ao produtor, no entanto com resultados menores do que os obtidos na ZM de baixa, com incremento de 29 kg ha^{-1} (Figura 3B) e R$ 67 ha^{-1} (Figura 4B).

Figura 3 – Comparativo de produtividade de grãos em forma de gráfico de barras entre as diferenças entre recomendação de densidade da GDM e do produtor, segmentado por ZM de alta e baixa.



Legenda: Valores positivos indicam maior produtividade com a recomendação da GDM; valores negativos indicam superioridade da recomendação do produtor. (A) Total da área, (B) ZM de alta, e (C) ZM de baixa.
Fonte: Autores (2025)

Figura 4 – Comparativo de retorno econômico em forma de gráfico de barras entre as diferenças entre recomendação de densidade da GDM e do produtor, segmentado por ZM de alta e baixa.



Legenda: Valores positivos indicam maior retorno econômico com a recomendação da GDM; valores negativos indicam superioridade da recomendação do produtor. (A) Total da área, (B) ZM de alta, e (C) ZM de baixa.
Fonte: Autores (2025)

3.2 Modelos de população de plantas

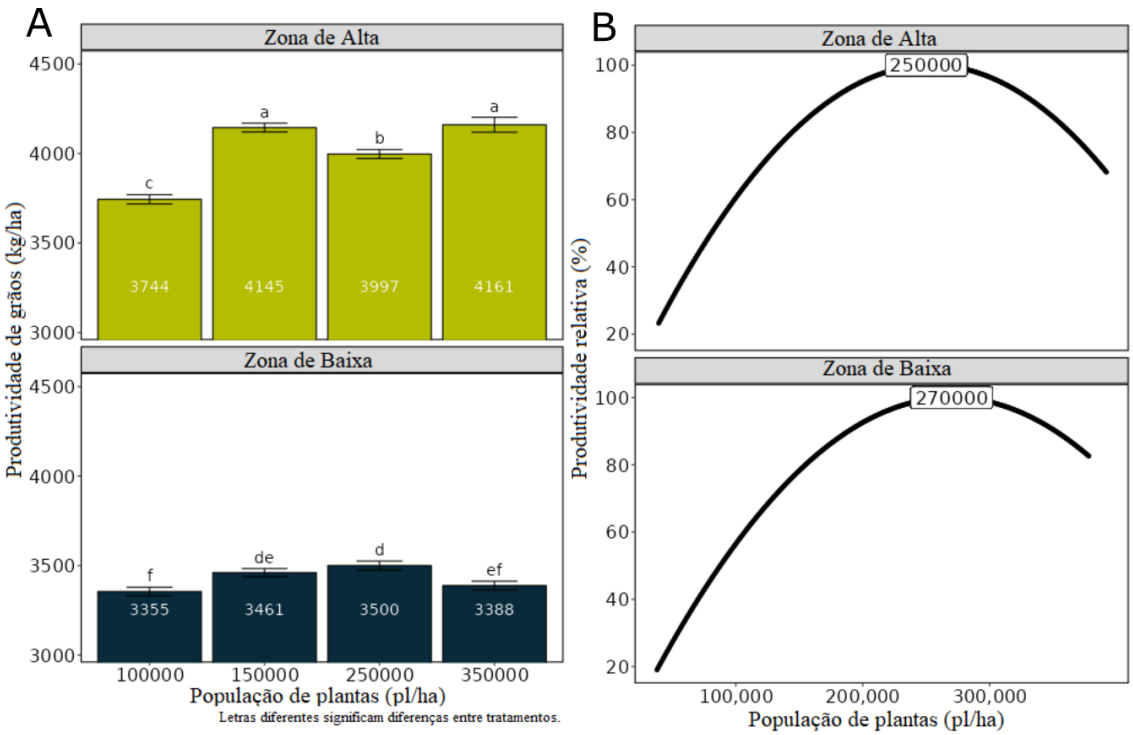
A partir dos dados coletados nos grids experimentais, foram ajustados modelos matemáticos para estimar a produtividade em função da população de plantas em cada ZM. A elevada quantidade de pontos amostrais disponíveis possibilitou maior robustez estatística e qualidade no ajuste dos modelos, permitindo capturar com mais

ISBN 978-65-990392-6-3

precisão a resposta da cultura em diferentes ambientes de produção. A separação das análises por ZM (alta e baixa produtividade) contribuiu para identificar comportamentos distintos de resposta à densidade, confirmando que as populações ideais de plantas variam de acordo com o potencial produtivo local (Figura 5A e B).

Esses modelos fornecem subsídios valiosos para o desenvolvimento de futuras recomendações técnicas mais adaptadas às condições reais de campo, com base em dados empíricos e espacialmente distribuídos. Além disso, representam uma base importante para a aplicação de manejo de taxa variável permitindo que densidades de semeadura sejam ajustadas de forma inteligente conforme as características agronômicas de cada ZM do talhão. Com isso, torna-se possível otimizar o uso de sementes, reduzir custos, aumentar a eficiência produtiva e, principalmente, melhorar a rentabilidade do sistema em ambientes heterogêneos, respeitando os limites e o potencial de cada área.

Figura 5 – Comparativo de produtividade de grãos e modelos de população de plantas para cada ZM.



Legenda: Exemplificação de um resultado de SmartGrid com (A) Gráfico de barras com o comparativo de cada população de planta e ZM do grid experimental, e (B) modelo de população de plantas ajustado para cada ZM.
Fonte: Autores (2025)

3.3 Discussões

Esse comportamento indica que as recomendações técnicas, como as desenvolvidas pela GDM, tendem a apresentar maior retorno agronômico e econômico especialmente nas ZM de baixa produtividade, onde os manejos convencionais do produtor, muitas vezes baseados em práticas padronizadas, não são suficientemente otimizados para explorar o potencial específico de cada ambiente. Nesses casos, a adoção de densidades ajustadas, pode reduzir a competição entre plantas em

ISBN 978-65-990392-6-3

ambientes restritivos, promovendo melhor aproveitamento dos recursos disponíveis e maior eficiência na conversão em grãos. Além disso, nessas ZM, mesmo pequenos ganhos de produtividade podem representar maior retorno marginal, especialmente quando associados à redução de custos com sementes e insumos. Esses resultados reforçam o papel da agricultura de precisão como ferramenta estratégica para aumentar a rentabilidade em áreas de menor desempenho agronômico, contribuindo para a redução da variabilidade intra-talhão e para o aumento da estabilidade produtiva.

Essa resposta diferenciada confirma resultados encontrados por Corassa et al. (2018) e da Silva et al. (2021), que destacam a importância do ajuste populacional com base na capacidade produtiva do ambiente. Além disso, reforça a necessidade de integração entre recomendações técnicas e informações espaciais do talhão para tomadas de decisão mais assertivas.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que a densidade de semeadura da soja deve ser ajustada de acordo com o potencial produtivo das ZM. A recomendação técnica de população de plantas da GDM apresentou melhor desempenho em comparação à densidade tradicional do produtor, principalmente em ZM de baixo potencial produtivo.

A coleta de dados em grids, com diferentes densidades e repetições, permitiu análises mais precisas. A quantidade de dados possibilitou o ajuste de modelos confiáveis, específicos para cada ZM, gerando subsídios para futuras recomendações técnicas por grupo de cultivares e condição ambiental. Esses modelos, aliados à técnicas de agricultura de precisão, contribuem diretamente para o manejo de densidade em taxa variável. Com isso, é possível otimizar o uso de sementes, reduzir custos e melhorar a rentabilidade.

Conclui-se que integrar dados de campo, técnicas de agricultura de precisão, modelagem estatística é uma estratégia eficiente para refinar o manejo populacional da soja, promovendo maior eficiência agronômica, econômica e à sustentabilidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a todos os produtores que trabalharam conosco a condução dos trabalhos para geração dos resultados. Agradecemos também ao Grupo Don Mario (GDM) pela disponibilização de recursos e das ferramentas necessárias para a condução do projeto de agricultura de precisão da GDM.

REFERÊNCIAS

COELHO, A. E., SANGOI, L., SAPUCAY, M. J. L. C., BRATTI, F., & BALBINOT JUNIOR, A. A. (2023). Soybean yield and profitability are affected by the spatial distribution of seeds in rows and seeding rate. **Agronomy Journal**, 116, 247–259. https://doi.org/10.1002/agj2.21492

CORASSA, G.M., AMADO, T.J.C., STRIEDER, M.L., SCHWALBERT, R., PIRES, J.L.F., CARTER, P.R. CIAMPITTI, I.A. (2018), Optimum Soybean Seeding Rates by Yield Environment in Southern Brazil. **Agronomy Journal**, 110: 2430-2438. https://doi.org/10.2134/agronj2018.04.0239

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. (Special Report, 80).

FRANCHINI, J. C., DEBIASI, H., BALBINOT JR., A. A., et al. (2020). **Estratégias para aumentar a produtividade da soja com sustentabilidade**. Embrapa Soja. Documentos 431.

MACHADO, B. L. R.; OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, Alberto Eduardo; BOTTEGA, E. L.; SARETTA, E. Estratégias de manejo o aumento da produtividade da soja na região central do RS. In: Vieira, Ariadna; Silva, Leonardo França da; Oliveira, Víctor Crespo de. (Org.). **Ciências Agrárias**: Debates emblemáticos e situação perene 2. 2ed. Ponta Grossa -PR: Atena, 2023, v., p. 46-48.

OLIVEIRA, Z.B.; KNIES, A. E.; WOLFFENBÜTTEL, S. Influence of plant spatial arrangement and water supplementation on soybean productivity. **Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas**, 16, 2022. https://doi.org/10.18011/bioeng.2022.v16.1055.

TAGLIAPIETRA, E. L. et al. **ECOFISIOLOGIA DA SOJA**: VISANDO ALTAS PRODUTIVIDADES. Santa Maria, ed. 2, 2022.

da SILVA, E.E., BAIO, F.H.R., TEODORO, L.P.R. et al. Variable-rate seeding in soybean according to soil attributes related to grain yield. **Precision Agriculture**, 23, 35–51 (2022). https://doi.org/10.1007/s11119-021-09826-7

ZANDONADI, R. S., TAVARES, R. C., & GIAROLA, N. F. B. (2019). Agricultura de precisão e suas aplicações na cultura da soja. **Revista Cultivando o Saber**, 12(3), 404–417.



CAPÍTULO 2

MODELING MAIZE YIELD USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS INTEGRATING VEGETATION INDICES AND ENVIRONMENTAL VARIABLES

Modelagem da produtividade do milho com redes neurais artificiais integrando índices de vegetação e outras variáveis ambientais

Amanda Avozani[1]; Lúcio de Paula Amaral[2]; Luiz Patric Kayser[2]; Telmo Jorge Carneiro Amado[2]; Felipe Guadagnini Leite[3]; Luciano Zucuni Pes[2]

[1] Texas Tech University, Programa de Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental. 2500 Broadway W, Lubbock - TX, 79409, Estados Unidos, amanda.avozani@ttu.edu
[2] PPGAP, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Avenida Roraima, 1000, Bairro Camobi, CEP 97105-900, Santa Maria – RS, Brasil. amaralufsm@gmail.com, patric@politecnico.ufsm.br, florestatel@hotmail.com, lucianopes@politecnico.ufsm.br.
[3] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Avenida Roraima, 1000, Bairro Camobi, CEP 97105-900, Santa Maria – RS, Brasil. felipegl98@yahoo.com.br

RESUMO

A disponibilidade hídrica é um fator determinante para o desenvolvimento e rendimento de culturas agrícolas. O presente estudo avaliou a influência do aporte hídrico na produtividade do milho em áreas irrigadas e não irrigadas, por meio de análise fatorial (AF) e redes neurais artificiais (RNA). Sensores de umidade do solo e pluviômetros foram instalados em campo, e voos com sensor multiespectral permitiram o cálculo de índices de vegetação. A AF indicou que mesmo baixos volumes de irrigação modificaram o sistema produtivo. Em condições sem irrigação, o déficit hídrico severo reduziu a produtividade, sendo refletido nos índices espectrais. No ambiente irrigado, o maior vigor vegetativo e a atividade fisiológica resultaram em maior rendimento. As RNAs apresentaram elevada acurácia preditiva, com destaque para variáveis como o conteúdo de água no solo e o índice PSRI na estimativa da produtividade.

Palavras-chave: Redes neurais artificiais. Sensoriamento remoto. Predição de produtividade.

ABSTRACT

Water availability is a determining factor for the development and yield of agricultural crops. This study assessed the impact of water input on maize productivity under irrigated (BIR) and non-irrigated (BNIR) conditions using factor analysis (FA) and artificial neural networks (ANNs). Soil moisture sensors and rain gauges were installed, and multispectral aerial imagery was used to compute vegetation indices. FA revealed that even low irrigation volumes modified the production system. Under non-irrigated conditions, severe water stress significantly reduced yield, as reflected in vegetation indices. In the irrigated environment, greater vegetative vigor and physiological activity led to higher productivity. ANNs demonstrated high predictive accuracy, with soil moisture and the PSRI index emerging as key variables for yield estimation.

Palavras-chave: Artificial neural networks. Remote sensing. Yield prediction.



ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUCTION

Water availability is a critical factor for crop performance, especially maize, which has a high water demand throughout its growth cycle (RIBEIRO et al., 2020; PASSIOURA, 2007). Water deficits during key phenological stages, such as flowering and grain filling, can significantly reduce growth and yield, as approximately 80% of grain weight is associated with water absorbed between pollination and physiological maturity (FLOSS, 2012). Under irregular rainfall and extreme weather conditions, water stress reduces photosynthetic activity, negatively impacting biomass production and grain filling (ALVES et al., 2014). Therefore, understanding the relationship between water input and agronomic performance in maize is essential for developing efficient management strategies under adverse climatic conditions (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009).

Based on multispectral imagery and vegetation index analysis, remote sensing offers an efficient approach to monitor crop water status and nutrient dynamics, as well as to estimate crop yield potential (THOMAS; SWAIN, 2018). Satellite and airborne sensors are used to collect high-resolution spectral data over large agricultural areas, enabling spatial and temporal assessments of canopy vigor (REGHINI; CAVICHIOLI, 2020). This technology facilitates proactive crop management by detecting both biotic and abiotic stress factors that influence crop performance (GAO et al., 2021).

Principal vegetation indices derived from spectral reflectance, such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), and Plant Senescence Reflectance Index (PSRI), capture variations in chlorophyll content, leaf area index, and senescence (JONES, 2013; CARVALHO, 2019; PEI et al., 2017; GAMON, 2008). These indices provide indirect but reliable indicators of crop health and development. While NDVI and EVI reflect overall vegetative vigor, SAVI minimizes soil background effects, and PSRI is effective for detecting physiological maturity and senescence (MCFEETERS, 1996; BHANDARI, 2022). Incorporating these indices into analytical models enhances the capacity to predict yield under different water management regimes (FERET et al., 2008; CARVALHO et al., 2020; AMARAL et al., 2021).

The integration of multivariate analysis techniques and artificial intelligence algorithms has enhanced the understanding of complex agricultural systems (CHERUBIN et al., 2011; ANTONINI et al., 2017). By reducing data dimensionality, factor analysis (FA) identifies groups of correlated variables that explain patterns within the production system (VICINI et al., 2018; MANLY; ALBERTO, 2019; HAIR, 2005). This approach facilitates the interpretation of relationships among morphological, environmental, and yield-related traits.

Concurrently, artificial neural networks (ANNs) are recognized for their ability to learn nonlinear patterns and deliver accurate predictions in complex systems with multiple interdependent variables (VAN KLOMPENBURG et al., 2020; BARRETO, 2002). Applications of these methods in agriculture have yielded promising results, particularly in yield modeling and in the detection of biotic and abiotic stress factors (CHLINGARYAN, 2018; KROSS et al., 2020; SOUZA et al., 2023). Therefore, the combined use of FA and ANNs represents a robust framework for understanding and predicting crop performance under varying environmental conditions.

This study aimed to analyze the influence of water supply on maize cultivation under two management conditions: with and without irrigation. Specifically, it sought to



understand the relationships among precipitation, irrigation, soil moisture, vegetation spectral indices, plant morphological attributes, yield components, and crop productivity by applying factor analysis to identify the main contributing factors. Additionally, the study employed artificial neural networks to estimate crop yield in both production environments, aiming to explore the potential of artificial intelligence techniques in modeling complex agricultural systems.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 Study Area

The experiment was conducted in a commercial maize field at the Crop Sector of the Colégio Politécnico, Federal University of Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brazil, during the 2021/2022 growing season. The local climate is classified as humid subtropical (Cfa) according to Köppen (WMO, 2018), with summer temperatures above 30 °C, an annual average temperature of 19.3 °C, and an annual average precipitation of 1,688 mm (INMET, 2022). The soil was classified as Typic Quartzipsamment (STRECK, 2004), with gently undulating topography that minimized edaphic variability.

The setup included two contrasting production environments: one irrigated (BIR) using a center pivot system (model AF3000-10, Fockink) and one non-irrigated (BNIR). Each environment contained a 25 × 40.5 m experimental block, subdivided into seven 5 × 4.5 m plots. The experiment used the early-cycle hybrid B2688PWU (Brevant), sown with a row spacing of 0.45 m at a target density of 80,000 plants ha^{-1}. Fertilization involved 180 kg ha^{-1} of nitrogen, with 30 kg ha^{-1} applied at planting (NPK 05-30-15) and two topdressings of 75 kg ha^{-1} each using urea at the V4–V5 and V7–V8 growth stages.

2.2 Data Collection, Processing, and Analysis

The field setup included eight PESSL iMETOS ECO D2 microstations (PESSL, 2023), with four installed in each environment. Each station was equipped with a rain gauge and two Watermark 200SS soil moisture sensors placed at depths of 10 cm and 30 cm, calibrated following IRROMETER (2023) guidelines. Volumetric soil water content (θ) was derived from sensor readings using the Van Genuchten model (1980), with depth-specific fitting parameters (Equation 1).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\ \psi)^n]^m} \quad (1)$$

Where: θ = volumetric soil water content ($cm^3 \cdot cm^{-3}$); θ_s = water content at saturation; θ_r = residual water content; α, n, m = soil water retention curve parameters; ψ = soil water potential (kPa).

Reference evapotranspiration (ET_0) was estimated using the Penman–Monteith method (ALLEN et al., 1998), applying dual crop coefficients to separate evapotranspiration into soil evaporation and crop transpiration components. A Davis weather station, located 1 km from the field site, recorded meteorological variables such as air temperature, relative humidity, solar radiation, wind speed, and

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque/RS · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

atmospheric pressure on a daily basis over 160 consecutive days. The reference evapotranspiration rate was calculated using Equation 2.

$$ET_0 = \frac{0{,}408\ \Delta\ (R_n - G) + \gamma\ \left(\frac{C_n}{T + 273{,}16}\right)\ u_2\ (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma\ (1 + C_d\ u_2)} \quad (2)$$

Where: ET_0 = reference evapotranspiration for a hypothetical grass crop with a fixed height of 0.12 m, a surface resistance of 70 m·s^{-1}, and an albedo of 0.23 (mm·day^{-1}); Δ = slope of the vapor pressure curve (kPa °C^{-1}); R_n = net radiation at the crop surface (MJ·m^{-2}·day^{-1}); G = soil heat flux (assumed to be 0 for daily estimates); γ = psychrometric constant (kPa °C^{-1}); C_n = numerator constant for the reference crop and time step; C_d = denominator constant for the reference crop; T = mean daily air temperature (°C); u_2 = wind speed at 2 meters height (m·s^{-1}); e_a = actual vapor pressure (kPa); e_s = saturation vapor pressure (kPa); (e_s − e_a) = vapor pressure deficit (kPa).

Soil water balance calculations were performed using the Irriga® system platform, incorporating soil physical properties such as field capacity, wilting point, porosity, and texture. Spatial interpolation of station and sensor data was carried out using the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method in ArcMap 10.8 (Esri, Redlands, CA, USA), based on Global Navigation Satellite System (GNSS) coordinates extracted from Red-Green-Blue (RGB) orthomosaics. Plot-specific values for precipitation, irrigation volume, soil moisture, and water balance were compiled from the processed layers.

Multispectral imagery was acquired in five UAV flights using a Phantom 4 Pro drone (DJI, Shenzhen, China), following the protocol of Jorge and Inamasu (2014), coupled with a RedEdge-Mx MicaSense sensor. Each flight adopted 75% forward overlap and 70% side overlap. Image sets were processed in Agisoft Metashape Professional (Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia), using GNSS Real-Time Kinematic (RTK) ground control points for orthomosaic generation. Vegetation indices, including NDVI, NDRE, NDWI, and PSRI, were computed from calibrated reflectance data using the equations presented in Box 1.

Box 1 - Formulas used to calculate vegetation indices in the experimental area of the Colégio Politécnico, UFSM Campus, Santa Maria – RS, Brazil, 2021/2022 growing season.

Vegetation Index	Equation	Reference
NDVI	(ρNIR - ρRED) / (ρNIR + ρRED)	Rouse et. al. (1973)
NDRE	(ρNIR - ρREDEDGE) / (ρNIR + ρREDEDGE)	Barnes et. al. (2000)
NDWI	(ρGREEN - ρNIR) / (ρGREEN + ρNIR)	McEceters (1996)
PSRI	(ρRED - ρGREEN) / (ρREDEDGE)	Merzlvak et. al. (1999)

Where: ρ = reflectance; NIR = near-infrared; RED = red; REDEDGE = red edge; GREEN = green.
Source: Authors (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

Georeferenced images were aligned with plot boundaries, and zonal statistics were used to extract minimum, maximum, and mean values for vegetation indices. Grain yield was obtained by harvesting 5.4 m² per plot, which ensured representative sampling of each experimental unit. Each replicate included five ears, which were shelled, dried to 13% grain moisture, and weighed (NUNES; BACKES, 2021). The adjustment to standard grain moisture was calculated using Equation 3.

$$Ud(\%) = PU \frac{100 - UCurrent\ Moisture}{100 - UD\%} \quad (3)$$

Where: Ud% = desired grain moisture content, and PU = wet weight.

Measurements included total plant height and ear insertion height as complementary traits to yield data. Yield components comprised ear length, ear diameter, number of rows per ear, kernels per row, and thousand-kernel weight. All values were compiled in spreadsheets to organize the complete dataset and ensure consistent formatting across variables, avoiding the need for further transformations.

Factor analysis was performed using Statistica v.12 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA) to identify the most influential variables. The procedure standardized all data with Z-scores and extracted factors using Varimax normalized rotation. Factors with eigenvalues above one and cumulative variance exceeding 70% were retained (RIBEIRO, 2001; VICINI et al., 2018; MANLY; ALBERTO, 2019). Separate analyses were conducted for the irrigated environment, the non-irrigated environment, and the combined dataset to capture variability specific to each production condition.

Artificial Neural Networks (ANNs) with a multilayer perceptron (MLP) architecture were implemented in IBM SPSS to model grain yield. The training process applied the backpropagation algorithm combined with Levenberg–Marquardt optimization for faster convergence. The dataset was divided into 70% for training and 30% for validation. Three models were generated, each including only variables with a Variable Importance Level (VIL), as defined in SPSS, greater than 70%, ensuring that the most relevant predictors remained in the final configurations, following the procedure described by Haykin (2009).

Model performance was evaluated using Root Mean Squared Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE), calculated according to Equations 4 and 5. These metrics were used to quantify prediction accuracy and assess potential bias in the ANN estimations. Comparisons were performed separately for the irrigated environment, the non-irrigated environment, and the combined dataset, enabling a comprehensive assessment of model performance across production scenarios.

$$EQ = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=t}^{N} (\phi_i - \psi)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Where: RMSE = root mean squared error; N = number of errors; φ = observed value; ψ = predicted value.

$$MAE = N1i = 1\sum N \mid \phi i - \psi i \mid \quad (5)$$

Where: MAE = mean absolute error; N = number of errors; φ = observed value; ψ = predicted value.

ISBN 978-65-990392-6-3

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Water availability and soil moisture

Maize exhibited high water demand during the growing cycle, particularly at flowering and grain filling, when water deficits impaired physiological processes and reduced yield (FLOSS, 2012; RIBEIRO et al., 2020). During the 2021/2022 season, climatic data recorded at the Federal University of Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, revealed substantial irregular rainfall distribution, directly affecting the crop water balance. Table 1 summarizes mean values of temperature, evapotranspiration (ETm), recommended irrigation (IR), applied irrigation (IA), and rainfall (P) across phenological stages.

Table 1 – Mean values of temperature, evapotranspiration (ETm), recommended irrigation (IR), applied irrigation (IA), and rainfall (P) for commercial maize cultivation, UFSM Campus, Santa Maria, RS, Brazil, 2021–2022 season.

Phenological stage	T (°C)	ETm (mm)	IR (mm)	IA (mm)	P (mm)
V0 - V4	19.40	16.63	17.10	0.00	130.95
V5 - V12	21.87	128.49	91.55	36.25	32.20
VT - R3	25.33	267.63	190.00	0.00	73.95
R4 – R6	24.48	145.66	15.00	0.00	379.34
Total:	-	**558.51**	**313.65**	**36.25**	**616.44**

Where: T = mean temperature; ETm = mean evapotranspiration; IR = recommended irrigation; IA = applied irrigation; P = rainfall.
Source: Authors (2025).

At the end of the cycle, ETm reached 558.51 mm, and total water input (rainfall + irrigation) reached 616.44 mm. No cumulative deficit occurred, but analysis by phenological stage indicated a deficit of 192.6 mm from November to January (V7–R3), considered a critical period for maize development (Table 2). This imbalance resulted from irregular rainfall and limited irrigation supply.

The La Niña phenomenon intensified rainfall irregularities in southern Brazil, restricting crop water supply even when monthly rainfall totals exceeded 100 mm (INMET, 2022). In the BIR, reservoir limitations allowed only three irrigation events during the cycle, substantially fewer than the number recommended by the Irriga® system (2022). These restrictions exposed plants to moderate deficits, although less severe than those in the BNIR. In the BNIR, the absence of irrigation combined with irregular rainfall caused prolonged deficits, reducing yield by 46% compared with the BIR.

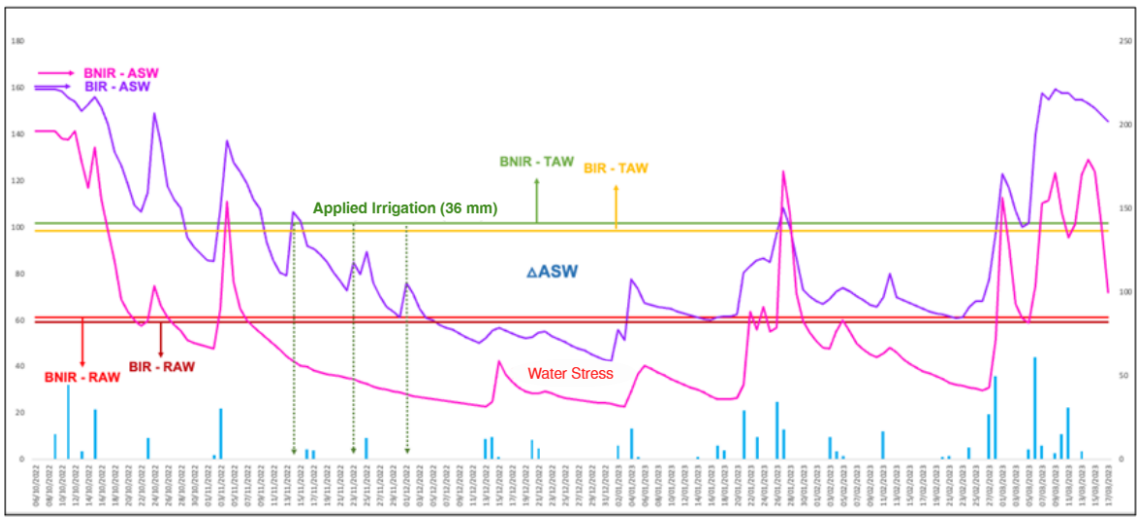
Table 2 - Mean values of recommended irrigation, applied irrigation, rainfall, ETm, and monthly water deficit for maize cultivation, UFSM Campus, Santa Maria, RS, Brazil, 2021–2022 season.

Month	IR (mm)	IA (mm)	P (mm)	ETm (mm)	D (mm)
October	17.10	0.00	107.46	41.09	68.37
November	56.55	24.75	56.90	87.83	-30.93
December	150.00	11.50	44.80	183.86	-142.06
January	90.00	0.00	136.56	156.17	-19.61
February	0.00	0.00	123.91	63.63	60.55
March	0.00	0.00	129.14	26.20	102.94
Total:	**313.65**	**36.25**	**616.44**	**558.51**	**37.26**

Where: IR = recommended irrigation; IA = applied irrigation; P = rainfall; ETm = evapotranspiration; D = water deficit.
Source: Authors (2025).

The figure 1 shows soil water availability during the crop cycle. In the BNIR, available water remained below the readily available water (RAW) threshold for 72 consecutive days, evidencing severe stress. This condition increased root exploration energy expenditure promoted stomatal closure, and accelerated senescence, as described by Silva et al. (2018). In contrast, the BIR maintained more favorable conditions because supplemental irrigation reduced the duration and intensity of deficits.

Figure 1. Daily variation of available soil water in irrigated and non-irrigated maize blocks, UFSM Campus, Santa Maria, RS, Brazil, 2021–2022 season.



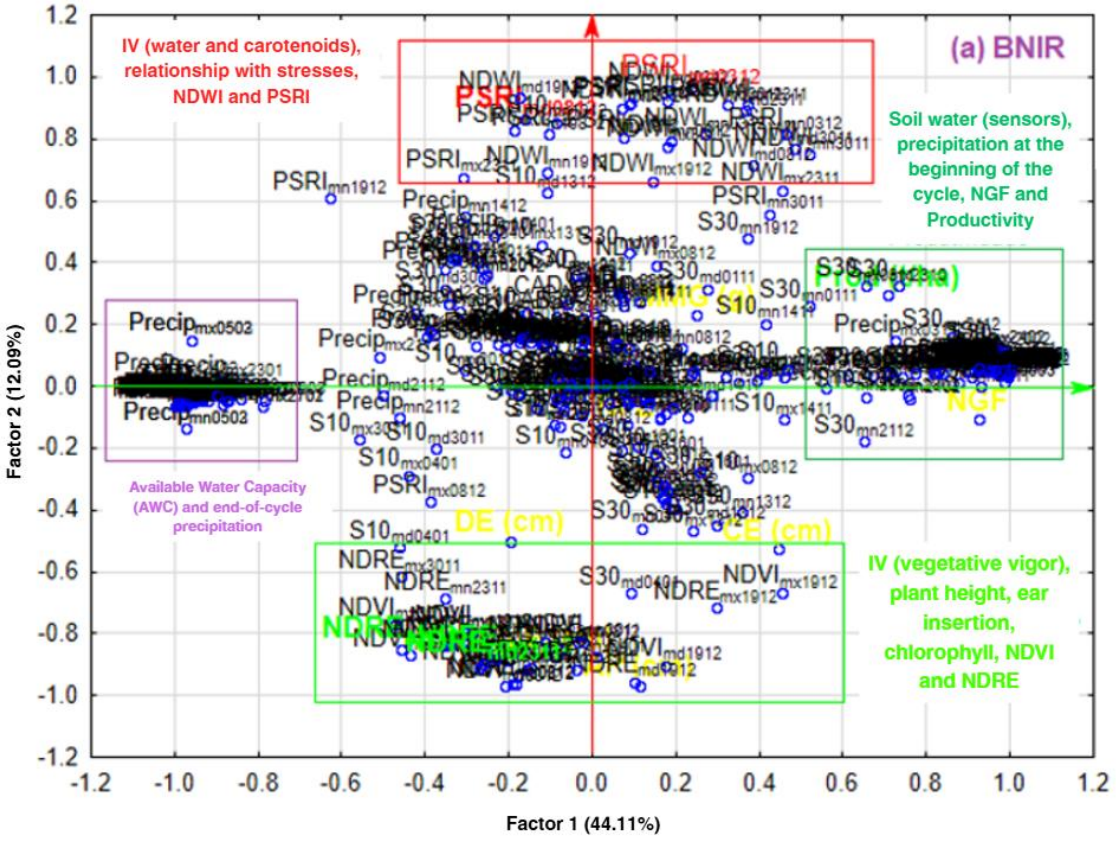
Where: ASW = available soil water variation; TAW = total available soil water; RAW = readily available water; BNIR = non-irrigated block; BIR = irrigated block. Blue bars represent rainfall, and green dashed bars represent applied irrigation.
Source: Authors (2025).

Thus, comparing environments demonstrated that supplemental irrigation, even when applied in smaller volumes than recommended, reduced stress intensity and contributed to higher yield stability. In contrast, the BNIR reflected the negative impact of water deficit on physiological processes and grain yield.

3.2 Vegetation indices, agronomic traits, and yield

Factor analysis (FA) highlighted contrasting patterns between the BIR and BNIR. In the BNIR, 437 variables and seven replicates produced six eigenvalues above 1, with the first two explaining 73.04% of total variability (FIGUEIREDO; SILVA, 2010). Factor 1 (44.11%) grouped water input and soil moisture variables with grain yield and kernel number per row. Factor 2 (27.65%) represented the severe deficit from November to January, including -142.06 mm in December. The cumulative deficit of -192.60 mm during V12–R3 strongly reduced the yield. Factor 4 (12.09%) aggregated vegetation indices and plant traits such as height and ear insertion, representing vegetative vigor. NDVI and NDRE contributed negatively, while NDWI and PSRI contributed positively, signaling physiological stress.

Figure 2 - Factor Analysis for non-irrigated environment in commercial maize cultivation, UFSM Campus, Santa Maria, RS, Brazil, 2021–2022 season.



Source: Authors (2025).

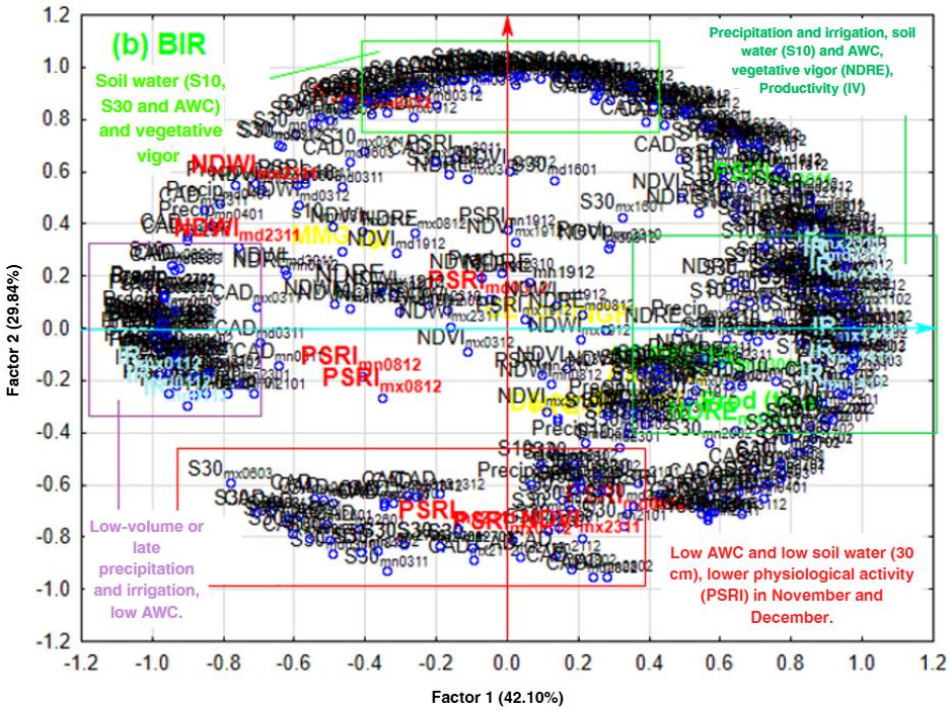
In the BIR, 446 variables and seven replicates produced six eigenvalues above 1, with the first two explaining 78.63% of total variability. Factor 1 (42.10%) grouped precipitation, irrigation, soil water content at 10 cm, CAD, yield, and vegetation indices

ISBN 978-65-990392-6-3

(NDWI, PSRI, NDRE). Factor 2 (29.84%) concentrated soil water at 30 cm, CAD, and PSRI. Factor 3 (18.43%) captured plant height, ear insertion, and vegetation indices (NDWI, PSRI, NDRE, NDVI). The dominance of factors related to vegetative vigor and the lower contribution of stress indicators reflected the positive effect of irrigation.

The joint FA confirmed these contrasts. Of the 13 eigenvalues, seven were above 1. Factor 1 explained 69.07% of variability, separating environments: BNIR with 4.19 t ha^{-1} and BIR with 7.81 t ha^{-1}. BNIR aligned with water deficit, stress indices (NDWI, PSRI), and reduced thousand-kernel weight. BIR grouped yield, yield components, and indices related to vigor (NDVI, NDRE) (VICINI et al., 2018); (MANLY; ALBERTO, 2019).

Figure 2 - Factor Analysis for irrigated environment in commercial maize cultivation, UFSM Campus, Santa Maria, RS, Brazil, 2021–2022 season.



Source: Authors (2025).

Artificial Neural Networks (ANNs) complemented FA, providing predictive yield models. In both environments, soil water at 10 and 30 cm and PSRI showed importance levels above 70%, confirming their relevance as predictors. The 6-4-1 architecture performed best, with R^2 = 92.5%, low mean absolute error and variance, and less than 6% difference between observed and predicted yields (Tables 3 and 4).

These results demonstrated that in the BNIR, vegetation indices primarily captured stress and senescence, while in the BIR, they represented vigor and biomass accumulation. Integrating vegetation indices with soil and yield data confirmed the efficiency of combined variables for predicting productivity, consistent with previous studies highlighting the role of ANNs in precision agriculture (NEVES, 2021; REN; CHEN; AN, 2017; MERZLYAN; SOLOVCHENKO; GITELSON, 1999).

Table 3. Root Mean Squared Error, Mean Absolute Error, and variance values for ANN architectures.

Architecture NE-NI-NS	EQM	EAM	VAR
6 - 4 - 1	0.152	0.140	0.000072
6 - 2 - 1	0.005	0.217	0.022472
6 - 3 -1	0.074	0.250	0.015488

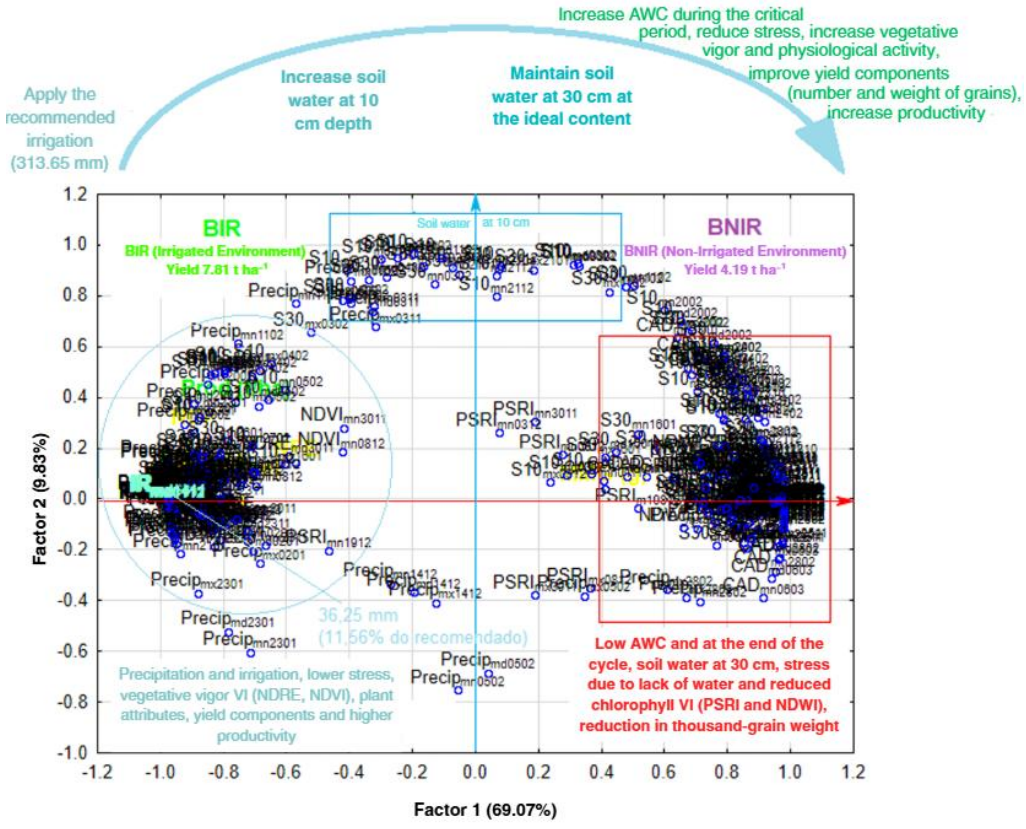
Where: NE = number of input neurons; NI = number of hidden or intermediate layers; NS = output layer; RMSE = root mean squared error (training); MAE = mean absolute error (validation); VAR = variance (validation).
Source: Authors (2025).

Table 4. Mean observed and ANN-predicted maize yield in irrigated and non-irrigated environments.

Block	Grain yield ($t \cdot ha^{-1}$)			
	Observed	Estimated (ANN)	Δ%	R^2
BIR	7.81	7.49	5.12	92.50
BNIR	4.19	4.47	3.92	

Source: Authors (2025).

Figure 3. Factor Analysis combining irrigated and non-irrigated environments in commercial maize cultivation, UFSM Campus, Santa Maria, RS, Brazil, 2021–2022 season.



Source: Authors (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

3.3 Discussion

A comparison of BIR and BNIR highlighted water availability as the key factor in regulating maize productivity. The prolonged deficit in the BNIR, especially during V12–R3, reduced water uptake, decreased grain mass, and limited yield to 4.19 t ha^{-1}. In contrast, the BIR maintained more favorable conditions, producing 46% higher yield (7.81 t ha^{-1}). These results supported previous findings that supplemental irrigation during critical stages sustains yield potential (FLOSS, 2012; RIBEIRO et al., 2020).

Vegetation indices reflected this contrast. The BNIR, NDWI, and PSRI were the most sensitive indicators, detecting stress and senescence, while NDVI and NDRE dropped sharply during deficit periods. In the BIR, NDVI and NDRE showed stronger correlation with yield, emphasizing the link between photosynthetic activity, biomass accumulation, and final productivity. Similar patterns were reported by Wang et al. (2019), who highlighted the relevance of vegetation indices in detecting abiotic stress.

FA separated stress-driven variables in the BNIR from vigor-related variables in the BIR, confirming that soil water availability shaped yield and spectral responses. Recent studies demonstrated that integrating soil, climate, and spectral variables in statistical or machine learning models improved predictive accuracy, supporting decision-making in precision agriculture (CHLINGARYAN, 2018; VAN KLOMPENBURG et al., 2020; LIMA et al., 2022).

ANNs achieved robust performance in predicting yield under both environments. The 6-4-1 architecture provided the best results, with R^2 above 92% and low prediction errors. Soil water at 10 and 30 cm and PSRI emerged as the most relevant predictors, aligning with studies that validated ANNs for integrating spectral and environmental data in maize yield modeling (NEVES, 2021).

Results confirmed that supplemental irrigation during critical growth stages reduced stress, maintained vegetative vigor, and secured higher yields. Combining spectral indices, agronomic traits, and machine learning models offered a powerful approach to real-time yield prediction, enhancing the resilience of production systems under variable climatic conditions.

4 CONCLUSIONS

Maize cultivated in the central region of Rio Grande do Sul during the 2021/2022 season faced severe water restrictions. Irrigation improved water availability, even with the application of only 11.5% of the recommended volume, and resulted in a 46% yield increase (t·ha^{-1}). Factor Analysis (FA) showed that irrigation applied during critical growth stages altered the dynamics of soil water content, plant responses in vegetative vigor (vegetation indices), biophysical traits, yield components, and grain productivity. Yield component analysis indicated that water shortage prevented complete ear and kernel formation, and yield could have been higher if crop water demand had been fully met. Among the vegetation indices, PSRI (carotenoids/stress) and NDRE (chlorophyll/vegetative vigor) stood out in the non-irrigated and irrigated environments, respectively.

Using multilayer perceptron Artificial Neural Networks enabled yield prediction based on pattern recognition from input variables. Soil moisture sensors at 10 and 30 cm depths and vegetation indices emerged as the most relevant predictors for the

models, confirming their importance for monitoring and yield forecasting in maize production.

REFERENCES

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56). Rome: FAO, 1998. 300 p.

ALVES, A. S. et al. Necessidades hídricas da cultura do milho sob irrigação suplementar nas condições edafoclimáticas da Chapada do Apodi. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 2., 2014, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: Inovagri, 2014. Disponível em: DOI:10.12702/ii.inovagri.2014-a479. Acesso em: 18 fev. 2022.

AMARAL, L. R. et al. Aplicações de drones na agricultura. In: QUEIROZ, D. M. et al. (org.). **Agricultura digital**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. p. 80–96. ISBN 978-65-5547-012-9.

ANTONINI, R. C. et al. Adoção e uso da agricultura de precisão na região das Missões do Rio Grande do Sul. **Holos**, v. 4, p. 106–121, 2017. Disponível em: https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/6297/3945. Acesso em: 18 fev. 2022.

BARNES, E. et al. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. In: **Proceedings of the fifth International Conference on Precision Agriculture**. 2000.

BARRETO, J. M. **Introdução às redes neurais artificiais**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Conexionismo e Ciências Cognitivas, Departamento de Informática e Estatística, 2002. Versão preliminar apresentada na Escola de Computação da Região Sul.

BHANDARI, M. et al. Assessing the effect of drought on winter wheat growth using unmanned aerial systems. **Remote Sensing**, v. 13, n. 6, art. 1144, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/13/6/1144. Acesso em: 18 fev. 2022.

CARVALHO, L. **Índices de vegetação obtidos por sensor proximal e embarcado em aeronave remotamente pilotada e sua relação com a produtividade do milho**. 2019. 91 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

CARVALHO, L. F. D. et al. Estado nutricional de plantas de milho avaliado por diferentes índices de vegetação nos estádios fenológicos. **Engenharia na Agricultura**, v. 28, p. 255–264, 2020. Disponível em: DOI: 10.13083/reveng.v28i.8564. Acesso em: 18 fev. 2022.

CHERUBIN, M. R. et al. Caracterização e estratégias de manejo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo utilizando a análise dos componentes principais. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 13, p. 196–210, 2011. Disponível em: https://www.conhecer.org.br/enciclop/2011b/ciencias%20agrarias/caracterizacao%20e%20estrategias.pdf. Acesso em: 18 fev. 2022.

CHLINGARYAN, A.; SUNTORNSUK, B.; SUTTOn, T. Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 151, p. 61–69, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.012. Acesso em: 18 fev. 2022.

FERET, J.-B. et al. PROSPECT-4 and 5: advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 6, p. 3030–3043, 16 jun. 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.02.012Acesso em: 18 fev. 2022.

FIGUEIREDO, D. B.; SILVA, J. A. Visão além do alcance: uma introdução à análise fatorial. **Opinião Pública**, v. 16, n. 1, p. 160–185, 2010.

FLOSS, E. L. Ecofisiologia e manejo de milho para altos rendimentos. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, n. 19–21, p. 19–21, 2012.

GAMON, J. A. Photochemical reflectance index (PRI) and remote sensing of plant CO_2 uptake. **New Phytologist**, v. 191, n. 3, p. 596–599, 2011. Disponível em: https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8137.2011.03724.x Acesso em: 18 fev. 2022.

GAO, Z. et al. Evaluation of vegetation indices for crop classification based on Sentinel-2A MSI data. **Remote Sensing**, v. 13, n. 8, p. 1529, 2021.

GENUCHTEN, M. V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892–898, 1980.

HAIR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593 p.

HAYKIN, S. **Neural networks and learning machines**. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2009. 906 p. ISBN 978-0-13-147139-9.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Boletins agrometeorológicos**. Brasília, 2022. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/ boletinsagro #Acesso em: 14 mar. 2023.

IRROMETER COMPANY, INC. **Basics of soil moisture**. Riverside, 2023. Disponível em: https://www.irrometer.com/basics.html. Acesso em: 14 mar. 2023.

JONES, H. G. **Plants and microclimate**: a quantitative approach to environmental plant physiology. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C. et al. (org.). **Agricultura de precisão**: resultado de um novo olhar. Brasília: Embrapa, 2014. p. 371–392. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/114264/1/CAP-8.pdf Acesso em: 18 fev. 2022.



KROSS, A. et al. Using Artificial Neural Networks and Remotely Sensed Data to Evaluate the Relative Importance of Variables for Prediction of Within-Field Corn and Soybean Yields. **Remote Sensing**, v. 12, n. 14, p. 2230, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/rs12142230. Acesso em: 18 fev. 2022.

LIMA, R. E. et al. Mathematical modeling and multivariate analysis applied to soybean grain quality: early harvest, drying and storage. **Scientific Reports**, v. 11, art. 23996, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41598-021-02724-y. Acesso em: 18 fev. 2022.(Análise multivariada aplicada à qualidade de grãos de soja; estudo com forte componente de modelagem.)

MANLY, B. J.; ALBERTO, J. A. **Métodos estatísticos multivariados**: uma introdução. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2019. 254 p.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação**: princípios e métodos. Viçosa: Editora UFV, 2009. 355 p. ISBN 9788572693738.

MASTERS, T. **Practical neural network recipes in C++**. San Diego: Academic Press, 1993. 493 p.

MERZLYAN, M. N.; SOLOVCHENKO, A. E.; GITELSON, A. A. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia Plantarum**, v. 106, n. 1, p. 135–141, 1999.

MCFEETERS, S. K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425–1432, 1996.

NEVES, M. J. F. **Estimativa de produtividade do milho em função das condições climáticas utilizando redes neurais artificiais**. 2021. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. Disponível em:https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/35813/1/EstimativaProdutividadeMilho.pdf. Acesso em: 14 mar. 2023.

NUNES, U. R.; BACKES, R. L. B. **Determinação do grau de umidade e peso de mil sementes**. Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Fitotecnia, Curso de Agronomia, Produção e Tecnologia de Sementes, 2021. Aula prática.

PASSIOURA, J. **The drought environment**: physical, biological and agricultural perspectives. Journal of Experimental Botany, v. 58, n. 2, p. 113–117, 2007.

PASSOS, M. L. V.; ZAMBRZYCKI, G. C.; PEREIRA, R. S. Balanço hídrico e classificação climática para uma determinada região de Chapadinha-MA. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 4, 2016. ISSN 1982-7679.

PEI, F. et al. Evaluation of normalized difference water index for soil moisture estimation using Landsat 8 OLI data in arid region. **Journal of Arid Land**, v. 9, n. 6, p. 854–863, 2017.



PEREIRA, J. R. et al. Métodos de medição da umidade do solo: uma revisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 805–813, 2006.

PESSL INSTRUMENTS. **iMETOS ECO D3**. Weiz, 2023. Disponível em: https://metos.at/pt/lorain/. Acesso em: 14 mar. 2023.

REGHINI, F. L.; CAVICHIOLI, F. A. Utilização de geoprocessamento na agricultura de precisão. **Interface Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 329–339, 2020.

REN, S.; CHEN, X.; AN, S. Assessing plant senescence reflectance index-retrieved vegetation phenology and its spatiotemporal response to climate change in the Inner Mongolian grassland. **International Journal of Biometeorology**, v. 61, n. 4, p. 601–612, 2017.

RIBEIRO, B. S. M. R. et al. **Ecofisiologia do milho visando altas produtividades**. Santa Maria: Pallotti, 2020. 230 p.

ROUSE, J. W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. [S.l.]: US Government Printing Office, 1973.

SILVA, T. et al. **Gestão de água na agricultura irrigada**. Brasília: Embrapa, 2018.

SOUZA, P. V. D. de; REZENDE, L. P. de; DUARTE, A. P.; MIRANDA, G. V. Maize Yield Prediction using Artificial Neural Networks based on a Trial Network Dataset. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 13, n. 2, p. 10338–10346, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.48084/etasr.5664. Acesso em: 18 fev. 2022.

THOMAS, J.; SWAIN, K. UAV remote sensing applications in agriculture: a review. **International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology**, v. 9, n. 3, p. 40–47, 2018.

VICINI, L. et al. **Técnicas multivariadas exploratórias**: teoria e aplicações no software Statistica. Santa Maria: Editora UFSM, 2018. 240 p.

WANG, Y. et al. Evaluating the spatiotemporal variation of vegetation cover and its response to climate change and human activities in the karst region of southwest China. **Journal of Environmental Management**, v. 217, p. 105–116, 2018.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **World Weather Watch Technical Report n. 198**: the WMO Information System. Geneva: WMO, 2018. Disponível em: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5789. Acesso em: 14 mar. 2023.



CAPÍTULO 3

SEMEADURA DE PRECISÃO: ESTADO DA ARTE E TENDÊNCIAS PARA O FUTURO.

Precision Seeding: State of the Art and Future Trends.

João Batista da Silva Santos[1]; Vinicius Kaster Marini[2]

[1] UFSM, Mestrando em Agricultura de Precisão, Av. Roraima, 1000 - Camobi, Santa Maria - RS, 97105-000, joao-santos.2@acad.ufsm.com.br;
[2] Ph.D. Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia - Av. Roraima, 1000, Prédio 10, Sala 402G 97105-900, Santa Maria – RS, Brasil. vinicius.marini@ufsm.br;

RESUMO

A semeadura de precisão é de suma importância para a agricultura brasileira, visto que diversos trabalhos vêm mostrando o impacto na produtividade quando se tem erros na plantabilidade. As indústrias de máquinas agrícolas de precisão tem sido um dos principais aliados e impulsionadora da Agricultura de Precisão no desenvolvimento de dosadores de sementes e funcionalidades que tenham valores agronômicos e rentáveis. O objetivo foi levantar o estado-da-arte das tecnologias inteligentes para semeadura de precisão, identificando as linhas de desenvolvimento tecnológico, os recursos já disponíveis comercialmente, e as tendências de desenvolvimento tecnológico para o futuro. Após todo levantamento ao analisar a semeadura de precisão no Brasil, considerando as diversas perspectivas discutidas neste trabalho, pode-se afirmar que o país tem atualmente as principais tecnologias aplicadas aos dosadores de sementes de última geração, sendo também o Brasil principal fabricante e desenvolver das tecnologias.

Palavras-chave: Semeadoras de Precisão. Dosadores de Sementes. Inteligência Artificial.

ABSTRACT

Precision seeding is of paramount importance to Brazilian agriculture, as several studies have demonstrated the impact on productivity of plantability errors. The precision agricultural machinery industry has been a key ally and driver of Precision Agriculture in the development of seed meters and features that offer agronomic and profitable value. The objective was to assess the state-of-the-art in smart technologies for precision seeding, identifying technological development paths, commercially available resources, and future technological development trends. After analyzing precision seeding in Brazil, considering the various perspectives discussed in this study, it can be stated that the country currently has the leading technologies applied to state-of-the-art seed meters, and is also a leading manufacturer and developer of these technologies.

Keywords: Precision Seeders. Seed Meters. Artificial Intelligence.

1 INTRODUÇÃO

A Agricultura de Precisão (AP) é compreendida como uma técnica de manejo que considera a variabilidade espacial e permite a aplicação sítio-específica de insumos, como fertilizantes, corretivos, pesticidas, semente e água por meio de mecanismos de precisão para aplicação. Considerando também a variabilidade



ISBN 978-65-990392-6-3

temporal, a AP permite uma utilização racional dos insumos, no momento e de acordo com a necessidade de cada local e dose correta, com potencial de benefícios econômicos e ambientais (Ezenne et al., 2019; Molin et al., 2015; Sharda et al., 2018)

Para Bernardi et al. (2014), a AP, denominada no inglês com os termos *Precision Agriculture, Precision Farming ou Site-specific Crop Management*, refere-se à utilização de equipamentos de alta tecnologia, envolvendo desde *hardwares* próprios até os mais variados *softwares* especializados e redes de transmissão de dados, criando um sistema complexo que permite coletar dados para monitoramento e avaliação de determinadas áreas destinadas à agricultura, para posterior execução dos fatores de produção, como a aplicação de fertilizantes, variação da densidade de sementes, controle do uso de água, dentre outros coeficientes.

A indústria de máquinas agrícolas tem sido um dos principais impulsionadores para a adoção da AP, visando gerenciar a variabilidade espacial da produção agrícola e otimizar a eficiência operacional. As máquinas agrícolas possuem alto nível de tecnologia embarcada (por exemplo, diferentes sistemas de sensores e atuadores), fornecendo informações valiosas de alta densidade para o gerenciamento específico do local (Cherubin et al., 2022; Fulton & Porter, 2020).

De acordo com o autor Jorge et al. (2024), a inteligência artificial na agricultura pode ser aplicada em diferentes tipos de dados, desde dados provenientes de sensores operando em campo, embarcados ou em máquinas, sensores IoT (Internet das coisas), em robôs terrestres, veículos aéreos, dados suborbitais e orbitais, os quais tem cada vez mais se destacado para os sistemas de visão computacional e sistemas de fusão de sensores.

Segundo Rêis et al. (2020), as tecnologias agrícolas digitais já estão presentes no campo, executando tarefas como direção automática com o auxílio de sistemas RTK-GPS no plantio, pulverização, capina, fertilização e colheita; tecnologias de aplicação de taxa variável usando mapas de produtividade, dados do solo e taxas de semeadura prescritas na fertilização e plantio; e identificação de plantas daninhas em tempo real na aplicação de pesticidas e capina mecânica.

Além disso, um grande número de sensores instalados nessas máquinas e trabalhando em conjunto com os sistemas RTK-GPS são usados para monitorar as culturas, o ambiente, as perdas de produção e os parâmetros operacionais em tempo real para fornecer dados para uso futuro ou para otimizar automaticamente o desempenho da máquina, ajustando as configurações do sistema sem interferência do operador. Alguns exemplos típicos incluem altura da plataforma da colhedora, controle de velocidade da máquina de acordo com os parâmetros da cultura, controle de velocidade do molinete, posição do cano de descarga em relação ao reboque, mapeamento de produtividade, controle automático de seção em semeadoras e pulverizadores e monitoramento geral do desempenho.

Um dos principais vetores de avanço tecnológico na mecanização agrícola é o desenvolvimento de tecnologias inteligentes para a semeadura de precisão. Seu crescimento é impulsionado pelo engajamento da indústria em desenvolver e validar tecnologias capazes de efetuar o manejo localizado e inteligente da operação de semeadura, com melhores resultados para a produtividade e a eficiência das culturas agrícolas. O objetivo desta contribuição é levantar o estado-da-arte das tecnologias inteligentes para semeadura de precisão, identificando as linhas de desenvolvimento tecnológico, os recursos já disponíveis comercialmente, e as tendências de desenvolvimento tecnológico para o futuro.



ISBN 978-65-990392-6-3

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente artigo consiste em uma pesquisa bibliográfica realizada por meio de artigos científicos, livros e sites especializados, para realizar a construção de conteúdo a partir de obras que abordam o tema proposto com foco em identificar tecnologias inteligentes para a semeadura de precisão, com particular interesse nas funcionalidades de dosagem e entrega de sementes.

Segundo Sousa, Oliveira e Alves (2021, p. 2) "a pesquisa bibliográfica está inserida, principalmente, no meio acadêmico e tem a finalidade de aprimoramento e atualização do conhecimento, por meio de uma investigação científica de obras já publicadas".

Com relação aos objetivos, essa pesquisa possui caráter exploratório ao proporcionar maior familiaridade com o tema, permitindo a construção de hipóteses para trabalhos futuros bem como ampliação e conhecimento da situação tecnológica dos dosadores de sementes de precisão presentes nas semeadoras-adubadoras.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este trabalho caracteriza o estado-da-arte em tecnologias inteligentes para semeadura de precisão por meio de um levantamento das tecnologias aplicadas para o melhoramento da precisão e da plantabilidade em semeadura.

Conforme a execução desse levantamento foi possível caracterizar frentes de desenvolvimento tecnológico visando evoluir o desempenho e a eficiência das operações de semeadura por meio do controle inteligente e localizado da semeadura de precisão.

Sendo assim, foi então identificadas as seguintes tecnologias onde será apresentada, aplicáveis ao desenvolvimento das funcionalidades de dosagem, condução e entrega de sementes na semeadura de precisão, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Tecnologias utilizadas na semeadura de precisão.

Índice	Tecnologias
1	Chaveamento do escoamento e da entrega de sementes em linhas individuais em resposta a características locais de solo e tráfego.
2	Tecnologias de monitoramento de plantio baseadas na medição do fluxo de sementes e no reconhecimento de características localizadas.
3	Variação da população de semeadura em resposta a zonas de manejo e trajetórias em curva.
4	Tecnologias de comunicação, conectividade e controle remoto e localizado em tempo real a partir do posto de trabalho.
5	Tecnologias de condução e entrega ativa das sementes em conjunção com a variação de população de semeadura.

Fonte: Autores (2025)

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque/RS · cotrijal · UFSM

1.1 Chaveamento do Escoamento e da Entrega de Sementes em Linhas Individuais em Resposta a Características Locais de Solo e Tráfego

Das tecnologias de chaveamento do escoamento e da entrega de sementes, identificam-se os seguintes recursos em produtos comercializados nos mercados brasileiro e internacional apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Função das tecnologias de chaveamento do escoamento e entrega de sementes.

ID	Função	Formas de Uso
1	Desligamento de linhas manual	Em fim de linha de semeadura
2	Desligamento de linhas automático	Em sobreposição de trajetória de máquina
		Em trilhas e marcos de tráfego controlado

Autores (2025)

Atualmente, é uma das principais funções utilizadas pelos agricultores na semeadura de precisão. Essa função, permite ao operador no momento de a semeadura desligar automaticamente a dosagem de sementes eliminando a sobreposição dos sulcos de semeadura, principalmente em áreas de arremate e bordaduras. Também pode proporcionar uma economia média de sementes de 5,03%, eliminando a competição entre as plantas e aumentando a produtividade (STARA, 2021). Na Figura 1 é possível visualizar o resultado prático do desligamento automático de linhas.

Figura 1. Desligamento automático de linhas na soja.



Fonte: Autores (2025)

Segundo Corassa et al. (2018), em um estudo avaliando a tecnologia de desligamento automático de linhas nas semeadoras para reduzir a área de plantio duplo e melhorar a produtividade de milho e soja, chegou à conclusão que no Brasil a sobreposição média nas áreas de plantio é de 5,5% da área total, podendo aumentar para talhões irregulares. Também, as perdas de produtividade do milho aumentaram

linearmente onde não se tinha o controle autómatico de linha, já para a produtividade na soja, foi menos sensível.

O desligamento de linha em sobreposição de trajetória de máquina, conhecido comercialmente como desligamento no rastro do pulverizador, tem se apresentado muito efetivo no campo. Segundo Lima Júnior et al. (2018), plantas amassadas principalmente pela ação dos rodados do pulverizador produzem menos, não produzem ou morrem. Na cultura da soja, Costa (2017) aponta que danos por amassamento de plantas podem chegar de 4 a 7% de perda de produtividade de grãos

Também, Bertollo et al. (2023), avaliando qual o sentido de pulverização na cultura da soja que proporciona redução da produtividade em função do amassamento da cultura, concluem que, a maior produtividade da cultura da soja ocorre onde não foram cultivadas as plantas nas linhas onde o pulverizador trafega e que, trafegar com o pulverizador no sentido transversal ou diagonal proporciona redução da produtividade da cultura da soja.

1.2 Tecnologias para Monitoramento de Plantio Baseadas na Medição do Fluxo de Sementes e no Reconhecimento de Características Localizadas

Das tecnologias de variação da razão de velocidade entre rotação do dosador e deslocamento da linha, identificam-se os seguintes recursos de monitoramento de grandezas em produtos comercializados nos mercados brasileiro e internacional, conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Tecnologias para monitoramento de plantio.

ID	Função	Formas de Uso
1	Entrega de sementes	Entrega de múltiplas
2	Singulação de sementes	Falha de entrega
		Coeficiente de variação
		Espaçamento entre plantas

Fonte: Autores (2025)

Esses recursos de monitoramento, quando se tratando da semeadura fornecem informações valiosas como a porcentagem de singulação, falhas, duplas, qualidade da distribuição e coeficiente de variação, sendo possível a visualização nos monitores dentro da cabine do trator onde o técnico ou operador responsável pela máquina possa tomar decisões estratégicas com relação ao plantio bem como na regulagem da semeadora-adubadora para obter uma ótima distribuição longitudinal de plantas. Por exemplo, Xie te al. (2021), desenvolveu um sistema de monitoramento de parâmetros de semeadura baseado em sensor laser e comunicação de porta serial sem fio apresentando precisão no monitoramento na velocidade de avanço de 5–10 km/h^{-1}, o erro médio de monitoramento da quantidade de semeadura foi inferior a 1,2%, e o erro médio de monitoramento da taxa qualificada de semeadura foi inferior a 0,5%. O sistema de monitoramento pôde alarmar a falha com precisão e em tempo

ISBN 978-65-990392-6-3

hábil, cuja taxa de sucesso do alarme atingiu 100%, e o tempo médio de resposta do alarme de falha foi inferior a 0,5 s.

1.3 Variação da População de Semeadura em Resposta a Zonas de Manejo e Trajetórias em Curva

Das tecnologias de variação da população de semeadura, identificam-se os seguintes recursos apresentados na Tabela 4 em produtos comercializados nos mercados brasileiro e internacional presentes nas principais semeadoras adubadoras de precisão.

Tabela 4. Tecnologias de variação da população de semeadura.

ID	Função	Formas de Uso
1	Variação da população por seção	Compensação de espaçamentos em curva
2	Variação da população por linha	Compensação de sementes conforme necessidade do solo

Fonte: Autores (2025)

A taxa variável de sementes é um manejo que apresenta bons resultados quando aplicada de maneira estruturada, com embasamento e apoiada no conhecimento agronômico e no uso tecnológico para determinar as melhores cultivares aliada a prescrição mais apropriada para cada zonas de manejo, de acordo com os objetivos pretendidos ao final do ciclo pensando na saúde do solo e na resposta econômica, isto é, precisa ser sustentável. (Molin et al., 2020; Polon et al., 2023)

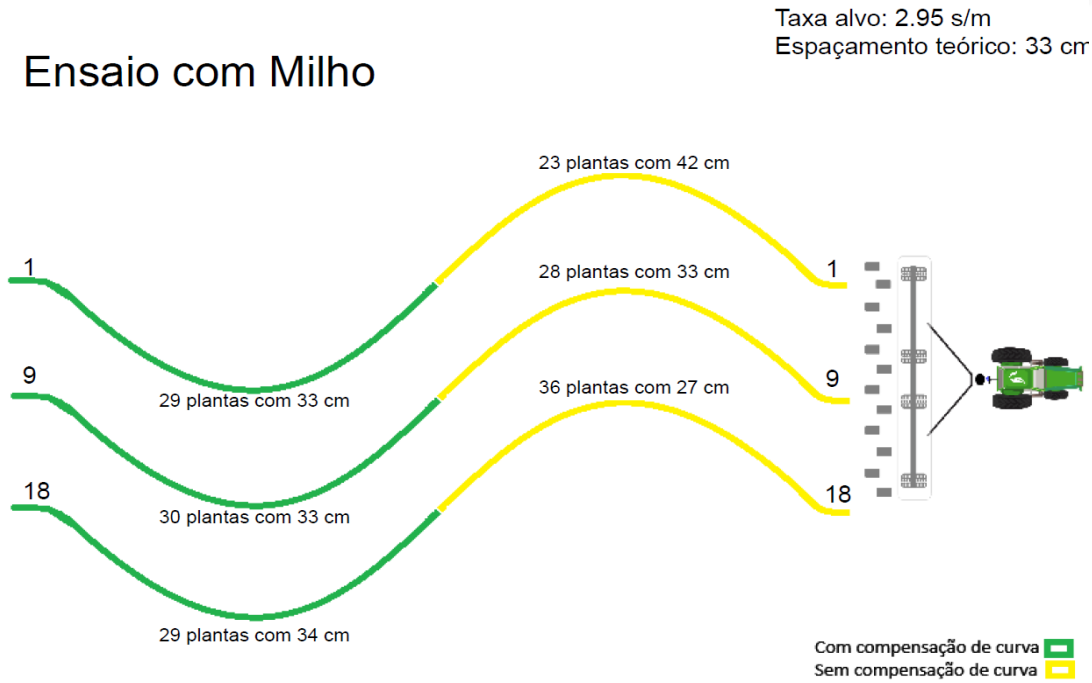
De acordo com Lacomi e Popescu (2015), a variação da população de sementes podem ocorrem por seção, onde as semeadoras também podem utilizar um motor hidráulico que controla a taxa de insumo aplicada variando o fluxo de oléo hidráulico fornecido ao motor hidráulico. O tamanho de um conjunto de seções é normalmente em torno de oito linhas de largura, o que significa que todas as oito unidades de linha devem estar ligadas ou desligadas e devem estar plantando na mesma taxa populacional em toda a seção. Já na variação por linha, geralmente tem-se trabalho com motores elétricos individuais por linha.

A tecnologia em trajetórias em curvas possibilita também, a realização da compensação de espaçamentos de sementes em curvas, Segundo Vincenze (2019), a funcionalidade de compensação de sementes faz com que a distribuição de sementes seja feita de maneira igualitária, ao contrário do que acontece com sistemas de transmissão mecânica, onde a parte de dentro da curva recebe mais sementes, enquanto a de fora fica com uma semeadura desigual.

Desta forma, a função é primordial para semeaduras em áreas de plantio em curvas e talhões que possuem bastante bordadura, pois permite realizar a distribuição correta da população de sementes evitando a competição por nutrientes, luz solar, água entre as plantas. Na figura 2 é possível verificar um exemplo de situação ocorrida em campo com compensação e sem compensação de curva na cultura do milho. (Vicenzo, 2019).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2. Compensação de espaçamentos em curva no milho.



Fonte: Autores (2025)

A compensação de giro, (ou espaçamentos de sementes em curva) refere-se à capacidade de uma semeadora adubadora de ajustar as taxas de semeadura dos dosadores para levar em conta a diferença de velocidade causada pelo plantio em torno de uma curva ou passagem curvilínea.

Mishler et at. (2024), avaliando a viabilidade da função de compensação de espaçamentos, encontraram resultados satisfatórios, com ajustes precisos de sementes e fertilizantes durante a semeadura em curva, onde a compensação, de acordo com os campos avaliados seria acionada entre 4,7% e 12,1% da área. O erro da taxa de semeadura sem compensação variou de 30,9% a 570,1%, enquanto com a função ativada, o erro da taxa de semeadura foi de apenas 0,1% a 10,4% e os resultados indicaram uma economia de custos de US$ 16 a US$ 212 ha^{-1}.

Ding et al. (2022), desenvolvendo um sistema de controle de compensação de giro de baixo custo para conservar sementes e aumentar a produtividade de plantadeiras de precisão de milho, encontrou resultados dos testes de campo em que o erro médio da taxa de semeadura não excedeu 4,52%, 2,12% e 2,77% para os raios de giros de 7 m, 14 m e 28 m, respectivamente. Esses valores foram significativamente menores do que aqueles nas condições equivalentes quando a função de compensação de giro foi desligada: 19,41%, 9,04% e 5,47%, respectivamente.

1.4 Tecnologias de Comunicação, Conectividade, Controle Remoto e Localizado em Tempo Real a partir do Posto de Trabalho

Das tecnologias de comunicação, conectividade, controle remoto e localizado, identificam-se os seguintes recursos comercializados nos mercados brasileiro e internacional apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Tecnologias de comunicação, conectividade e controle.

ID	Função
1	Central de comando e controle própria
2	Interoperabilidade com monitor disponível no trator
3	Comunicação remota via wi-fi e/ou Bluetooth
4	Comunicação com a máquina via barramento CAN/ISOBUS
5	Conectividade entre várias máquinas em plantio

Fonte: Autores (2025)

Dentre os diversos sistemas de comunicação, o uso da comunicação remota via wi-fi e/ou Bluetooth; tem obtido grande destaque nas tecnologias presentes no campo, pois a estrutura de componentes necessários para comunicação na máquina é mais enxuta, uma vez que a redução de chicotes eletrônicos evita problemas com interferências nas estruturas das máquinas.

1.6 Tecnologias de Condução e Entrega Ativa das Sementes em Conjunção com a Variação de População de Semeadura

Das tecnologias de condução e entrega ativa das sementes em conjunção com a variação de população de semeadura, um tópico que tem crescido bastante dentro das indústrias de semeadoras de precisão devida à importância de se ter uma boa semeadura, identificam-se os seguintes recursos comercializados nos mercados brasileiro e internacional apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Tecnologias de condução ativa e entrega de sementes.

ID	Função	Formas de Uso
1	Uso de elementos ativos para o repasse e a descida das sementes Orientação	Elementos de taliscas ou dedos flexíveis Elementos de cerdas e escovas Pressão positiva no condutor
2	física do elemento dosador relativa ao campo gravitacional	Dosador no plano longitudinal Dosador no plano transversal Dosador inclinado no plano longitudinal Dosador inclinado em plano qualquer

Fonte: Autores (2025)

A utilização de dosadores de sementes com tecnologias de condução ativa de sementes tem ganhado cada vez mais visibilidade, pois permite dosar com precisão em velocidades extremas de até 22 km/h. Por exemplo, Olomitutu et al. (2024) avaliando um dosador de condução ativa com o aumento da velocidade de plantio não afetou a produtividade da soja, e semeadora de precisão na velocidade de 17,7 km h^{-1} apresentou o mesmo nível de desempenho que a semeadora mecânica na velocidade de 9,7 km h^{-1} em 2023. Pereyra et al. (2022), também avaliando o sistema Exact Emerge da fabricante John Deere verificou que, melhorou a uniformidade entre plantas aumentando o número de plantas perfeitamente espaçadas, diminuiu o número de plantas duplas e plantas mal colocadas em comparação com a semeadora com tecnologia Max emerge.

Chen et al. (2024), realizando o desenvolvimento de dispositivo de dosagem de precisão de alta velocidade para milho, utilizando o método de superfície de resposta,

ISBN 978-65-990392-6-3

obteve resultados em que a qualidade ideal da dosagem de sementes foi alcançada a 14,2 km/h e 13,5 kPa. Os testes de validação mostraram uma taxa qualificada de 97,93%, com uma variação do coeficiente de 8,97% para este método.

Kovács & Casteel (2023), avaliando a semeadeira com tecnologia Exact Emerge ao longo de três safras de soja em diferentes velocidades de plantio e taxas de semeadura, conclui que a velocidade de plantio não influenciou a emergência das plantas, a população de plantas não foi amplamente afetada pela velocidade de plantio, a precisão da semeadura diminuiu em até 7% quando a velocidade de plantio aumentou de 8 para16 km/h^{-1} nos primeiros 2 anos, e em cerca de 10% quando a velocidade de plantio aumentou de 8 para 20 km/h^{-1} em 2016. Porém a precisão da semeadura aumentou em 3% quando a velocidade de plantio aumentou de 8 para 16 km/h^{-1} em 2017, observando que a velocidade de plantio não afetou a produtividade de grãos.

Empresas focadas no desenvolvimento de semeadoras-adubadoras de precisão estão se empenhando cada vez mais para trazer soluções de dosagem e condução, na Figura 3 é possível visualizar os três principais modelos de tecnologia por condução ativa de sementes sendo (A) Mecanismo de Cerdas ou Escova, (B) Mecanismo de Taliscas e (C) Mecanismo por Pressão Positiva.

Figura 3. Mecanismos de condução ativa de sementes.



(A) Escova ou Cerdas

Fonte: John Deere (2025)



(B) Talisca

Autores (2025)



(C) Pressão Positiva

Vaderstad (2025)

A demanda para se ter uma boa plantabilidade tem crescido cada dia mais, diversos resultados de pesquisas de campo têm mostrado o impacto negativo na produtividade, principalmente nas culturas de soja e milho.

Por exemplo, Hörbe (2015) avaliando a distribuição espacial de plantas de milho e sua relação com o vigor e a produtividade no sul do Brasil, conclui que a produtividade do milho é afetada negativamente para cada 10% de aumento no CV, sendo o decréscimo na produtividade de 1.356 e 815 kg ha^{-1}, demonstrando-se a importância da distribuição das plantas e espaçamentos corretos.

Trabalhos da Equipe Field Crops, realizado por Lambrecht et al (2025), na safra de soja 2024/2025, onde foram avaliadas 158 propriedades rurais em 15 estados diferentes, reportaram que lavouras com CV maior que 60% podem ter perdas de até 66,7 kg de grãos por hectare na medida que se tem um aumento de 1% no CV.

Bisognin (2018), ao avaliar a relação da plantabilidade com a produtividade do feijoeiro comum de segunda safra, evidenciou que a produtividade mínima foi de 1348 kg ha^{-1} e máxima de 1837 kg ha^{-1}, uma redução de 26,6% na produtividade, quando ouve variação de 0% há 60% no coeficiente de variação. O autor concluiu que para cada 20% a mais de C.V., se perde 163 kg ha^{-1}.

Esses dados mostram a importância e atenção que devem ser redobradas no momento da semeadura das culturas para que as lavouras possam expressar todo o seu potencial produtivo bem como a indústria de máquinas precisas no desenvolvimento de tecnologias que possam otimizar a plantabilidade.

1.7 Tendências Futuras

Das tecnologias de futuro para o desenvolvimento de precisão na entrega de sementes, identificam-se as seguintes possibilidades apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Tecnologias futuras e tendência.

ID	Função	Formas de Uso
1	Desenvolvimento de semeadoras autopropelidas de condução assistida e autônoma	Condutividade elétrica Umidade de solo Composição de solo Visualização interna do sulco de plantio
2	Medição de propriedades de solo em tempo real para o trabalho de plantio	Dosador no plano transversal Dosador inclinado no plano longitudinal Dosador inclinado em plano qualquer

Fonte: Autores (2025)

A revolução da tecnologia na agricultura vem ocorrendo de forma exponencial, e a otimização de recursos tem sido cada vez mais acelerada. Sua aplicação vem transformando a forma como as empresas, técnicos e agricultores mais jovens vem conduzindo a produção agrícola, permitindo melhorias significativas na eficiência e economia dos sistemas de produção. (Horsch, 2025; Nexat, 2025;)

Softwares e *hardwares* dedicados para aplicação e execução de tarefas nas semeadoras de precisão estão surgindo cada dia mais. Nota-se uma tendência para o desenvolvimento de semeadoras autônomas onde o operador poderá controlar as máquinas diretamente do escritório remotamente.

A fabricante alemã Horsch, por exemplo, possui em validação no Brasil o ROG 500 que é uma semeadora autopropelida com a capacidade de percorrer autonomamente as linhas previamente planejadas no computador.

A empresa Nexat, também alemã em parceria com a fabricante Baldan Implementos agrícolas possuem no Brasil uma máquina de trabalho autônoma equipada com um sistema de monitorização periférica. Uma cabine que pode ser girada em 270° está disponível para monitoramento do processo. Isso estabelece a

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque/RS · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

base para a operação totalmente automatizada da máquina e permite a orientação manual do veículo durante o transporte.

A necessidade de tecnologias que possam otimizar a operação de plantio, aumentar a eficiência trabalhando de noite e dia, aproveitando melhor a janela de plantio vem se tornando cada dia mais necessário, visto que cada segundo parado se torna prejuízo.

4 CONCLUSÃO

Ao analisar a semeadura de precisão no Brasil, considerando as diversas perspectivas discutidas neste trabalho, pode-se afirmar que o país tem atualmente as principais tecnologias aplicadas aos dosadores de sementes de última geração, sendo também o Brasil principal fabricante e desenvolver das tecnologias

Há um grande avanço em sistemas de semeadora autopropelidas e autônomas.

REFERÊNCIAS

BERNARDI, A. C. C. et al. (2014). **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa.

BERTOLLO, G. M et. al. **Amassamento das plantas na pulverização**. Disponível em: <https://www.apsulamerica.com.br/trabalho18>. Acesso em: 6 jul. 2025.

BISOGNIN, Mateus Bortoluzi. **Plantabilidade e sua relação com a produtividade do feijoeiro comum (Phaseolus Vulgaris L.) de segunda safra.** Dissertação– Mestrado em Agricultura de Precisão. UFSM, Santa Maria, 2018.

Coelho, J. P. C., & Silva, J. R. M. (2009). **Agricultura de Precisão**. Lisboa: AJAP.

CHEN, Junzhi et al. Development of high-speed precision maize metering device for dense planting pattern with standard ridges. **Frontiers in plant science**, v. 15, p. 1452699, 2024.

CORASSA, G. M. et al. Planter Technology to Reduce Double-Planted Area and Improve Corn and Soybean Yields. **Agron. J.**, v. 110, p. 300-310, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.2134/agronj2017.07.0380. Acesso em: 14 set. 2025.

COSTA, C. C. **Custos e benefícios do uso da pulverização aérea de agrotóxicos na agricultura.** Embrapa Instrumentação - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E), v. 1, n. 1, p. 1-26, 2017.

CHERUBIN, M. R. et al. Precision Agriculture in Brazil: The Trajectory of 25 Years of Scientific Research. **Agriculture**, v. 12, n. 11, 1882, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agriculture12111882. Acesso em: 14 set. 2025.

DING, Youqiang et al. Low-cost turn compensation control system for conserving seeds and increasing yields from maize precision planters. **Computers and electronics in agriculture**, v. 199, n. 107118, p. 107118, 2022.

Ezenne, G. I. et al. Current and potential capabilities of uas for crop water productivity in precision agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 158 164, 2019.

HORBE, Tiago de Andrade Neves. **Distribuição espacial de plantas na fileira e sua relação com a produtividade da cultura do milho**. 2015. 66 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

HORSCH. **Horsch apresenta semeadora autônoma**. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/horsch-apresenta-semeadora-autonoma>. Acesso em: 6 jul. 2025.

ACOMI, C.; POPESCU, O. A New Concept for Seed Precision Planting. **Journal Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 6, p. 38–43, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.08.035. Acesso em: 14 set. 2025.

JORGE, L. A. DE C. et al. **Inteligência artificial aplicada na agricultura de precisão e digital.** Em: Agricultura de Precisão: São Carlos, SP, Brazil: Editora Cubo, 2024. p. 58–70.

KOVÁCS, Péter; CASTEEL, Shaun N. *Evaluation of a High-speed Planter in Soybean Production*. In: South Dakota State University. **Brookings**, SD, 2023. Disponível em: South Dakota State University. Acesso em: 12 set. 2025

LAMBRECHT, Darlei Michalski et al. **Soybean Money Maker**: Identificando o Yield Gap das lavouras de soja. 5. ed. Santa Maria, 2025. 116 p. Recurso eletrônico. ISBN 978-85-54856-84-7. Disponível em PDF.

LIMA JUNIOR, I. D. S., DEGRANDE, P. E., DE OLIVEIRA, C. M. A., & PILETTI, L. M. M. Aspectos produtivos do algodoeiro em cultivo ultra adensado, adensado e convencional em diferentes ângulos de deslocamento do pulverizador. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 8, n. 3, 2018.

Mishler, B.; Badua, S.; Sharda, A. Benefits of planter turn compensation on irregular shaped fields. **Applied engineering in agriculture**, v. 40, n. 3, p. 293-301, 2024.

Molin, J. P., Amaral, L. R., & Colaço, A. F. (2015). **Agricultura de precisão**. Oficina de Textos.

MOLIN, J. *et al.* Precision agriculture and the digital contributions for site-specific management of the fields. **Ciencia agronomica**, v. 51, n. 0, 2020. Disponível em: https://periodicos.ufc.br/revistacienciaagronomica/article/view/84919. Acesso em: 3 set. 2025.



ISBN 978-65-990392-6-3

NEXAT. **NEXAT System Tractor leva medalha de ouro na Agritechnica 2022**. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/nexat-system-tractor-leva-medalha-de-ouro-na-agritechnica-2022>. Acesso em: 6 jul. 2025.

OLOMITUTU, O.; ZHANG, H.; WANG, X. Seed placement accuracy of active-drive seed meters under high planting speeds. **Precision Agriculture**, v. 25, n. 1, p. 55–68, 2024.

PEREYRA, V. M. et al. Early-season plant-to-plant spatial uniformity can affect soybean yields. **Sci Rep**, v. 12, 17128, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41598-022-21385-z. Acesso em: 14 set. 2025.

POLON, Airton. **Uso de motores elétricos em semeadoras como ferramenta para o aumento da produtividade em ambientes de agricultura de precisão.** 2023. Dissertação de Mestrado em Agricultura de Precisão - UFSM, Santa Maria, 2025. Disponível em: Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/29035>. Acesso em: 06 jul. 2025.

SHARDA, A. et al. Equipamentos de Precisão Variável. In: **Fundamentos da Agricultura de Precisão**. Madison, WI, EUA: Sociedade Americana de Agronomia e Ciência do Solo da América, 2018. p. 155–168.

SOUSA, A. S.; Oliveira, G. S. e Alves, L. H. A PESQUISA BIBLIOGRÁFICA: PRINCÍPIOS E FUNDAMENTOS. **Cadernos da Fucamp**, v.20, n.43, p.64-83/2021.

STARA. **Como funciona o Sistema de Desligamento Linha a Linha da Stara?** Stara - Institucional, 11 out. 2021. Disponível em: <https://www.stara.com.br/noticias/departamento-de-rede/como-funciona-o-sistema-de-desligamento-linha-a-linha-da-stara>. Acesso em: 06 jul. 2025

Vicenzo, Douglas. **Especial Expodireto**: vDrive agora é item de fábrica nas plantadoras Valtra. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/especial-expodireto-vdrive-agora-e-item-de-fabrica-nas-plantadoras-valtra>. Acesso em: 6 jul. 2025.

XIE, Chunji *et al.* Precision seeding parameter monitoring system based on laser sensor and wireless serial port communication. **Computers and electronics in agriculture**, v. 190, n. 106429, p. 106429, 2021.



ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 4

AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN ARGENTINA: DESDE LA INCORPORACIÓN TECNOLÓGICA HASTA GESTIÓN ESTRATÉGICA DE DATOS

Agricultura de precisão na argentina: da incorporação de tecnologia à gestão estratégica de dados

Fernando Scaramuzza[1]

[1] Ing. Agr. (MSc.) Asesor – Consultor privado en Agricultura de precisión y mecanización agrícola. Santa Cruz 725, 5986, Oncativo - Córdoba, Argentina, scaramuzza.fer@gmail.com

RESUMO

En Argentina solo 2 de cada 10 productores completan el ciclo de adopción de tecnología. Tiene un papel fundamental el agrónomo como “director de orquesta” del ecosistema de datos. Además, el contratista rural es un aliado estratégico, realizan más del 60% de las labores. Más de 22.350 máquinas conectadas cubren el 70% de las hectáreas sembrables.. La dosificación variable y aplicaciones selectivas mejoran rendimientos, reducen insumos y aportan sostenibilidad al sistema. La agricultura de precisión pasó de equipos a gestión integral de datos. Aunque Argentina se posiciona entre los países líderes en la incorporación de tecnologías agrícolas, la adopción plena de la agricultura de precisión en todo su ciclo aún presenta oportunidades de mejora. El futuro se visualiza de la siguiente manera: integrando tecnología, conocimiento y personas.

Palavras-chave: Adopción 1. Gestión de datos 2. Agronomía de precisión 3.

ABSTRACT

Na Argentina, apenas dois em cada 10 produtores concluem o ciclo de adoção da tecnologia. O agrônomo desempenha um papel fundamental como "condutor" do ecossistema de dados. Além disso, os empreiteiros rurais são aliados estratégicos, realizando mais de 60% do trabalho. Mais de 22.350 máquinas conectadas cobrem 70% dos hectares aráveis. Dosagens variáveis e aplicações seletivas melhoram a produtividade, reduzem o uso de insumos e contribuem para a sustentabilidade do sistema. A agricultura de precisão migrou de equipamentos para o gerenciamento abrangente de dados. Embora a Argentina esteja entre os países líderes na incorporação de tecnologias agrícolas, a adoção plena da agricultura de precisão em todo o seu ciclo ainda apresenta oportunidades de melhoria. O futuro é vislumbrado da seguinte forma: integrando tecnologia, conhecimento e pessoas.

Keywords: Adoption 1, Data management 2, Precision agronomy 3.

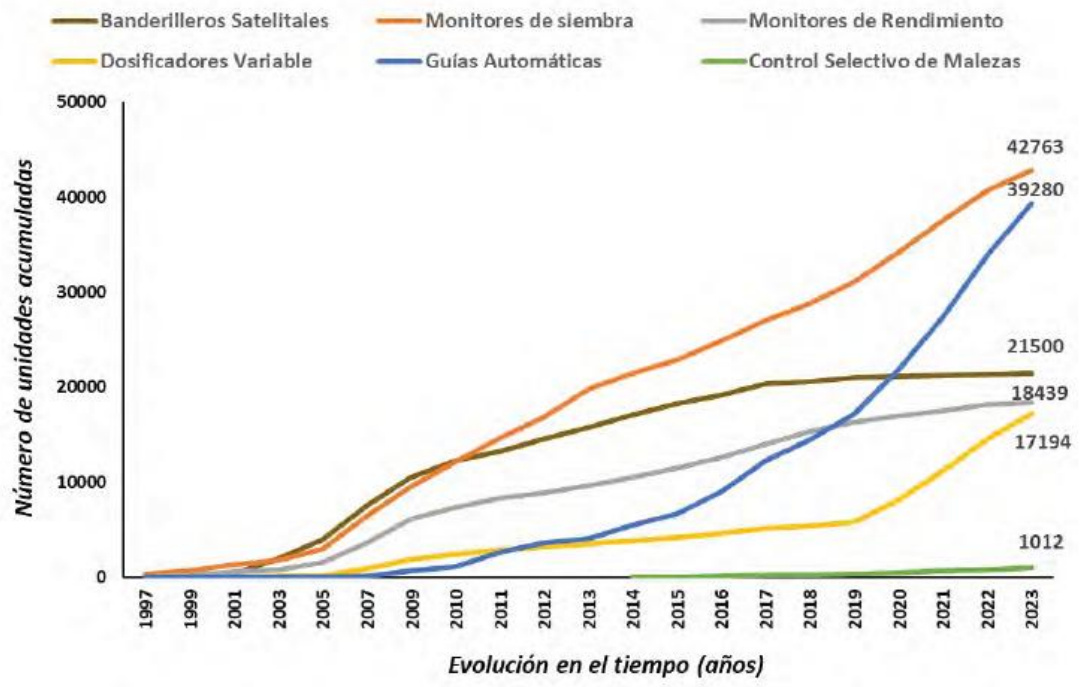
1 INTRODUÇÃO

La evolución de la agricultura de precisión en Argentina refleja el recorrido de su sistema productivo: desde la adquisición de equipos tecnológicos hacia una gestión

ISBN 978-65-990392-6-3

integral orientada a la eficiencia productiva y la sostenibilidad. Lo que, a mediados de la década de 1990 impulsado por el INTA, comenzó como la adopción incipiente de herramientas aisladas, hoy se consolida como una verdadera agronomía de precisión, en la cual los datos generados por la maquinaria se constituyen en insumos estratégicos para generar información. Las plataformas AgTech, entendidas como soluciones basadas en tecnologías digitales aplicadas a las distintas etapas de las cadenas agroalimentarias, permiten transformar esa información en valor agregado para la toma de decisiones (Figura 1).

Figura 1 - Estimación de la evolución de número de equipos, en unidades acumuladas en los diferentes rubros tecnológicos, para Argentina.



Fuente: Scaramuzza, F.; Villarroel, D. INTA Manfredi 2024.

En este contexto, el proceso de digitalización se proyecta como motor del progreso sectorial, habilitando la competitividad del agro argentino frente a las crecientes demandas globales en materia de eficiencia, trazabilidad y sustentabilidad.

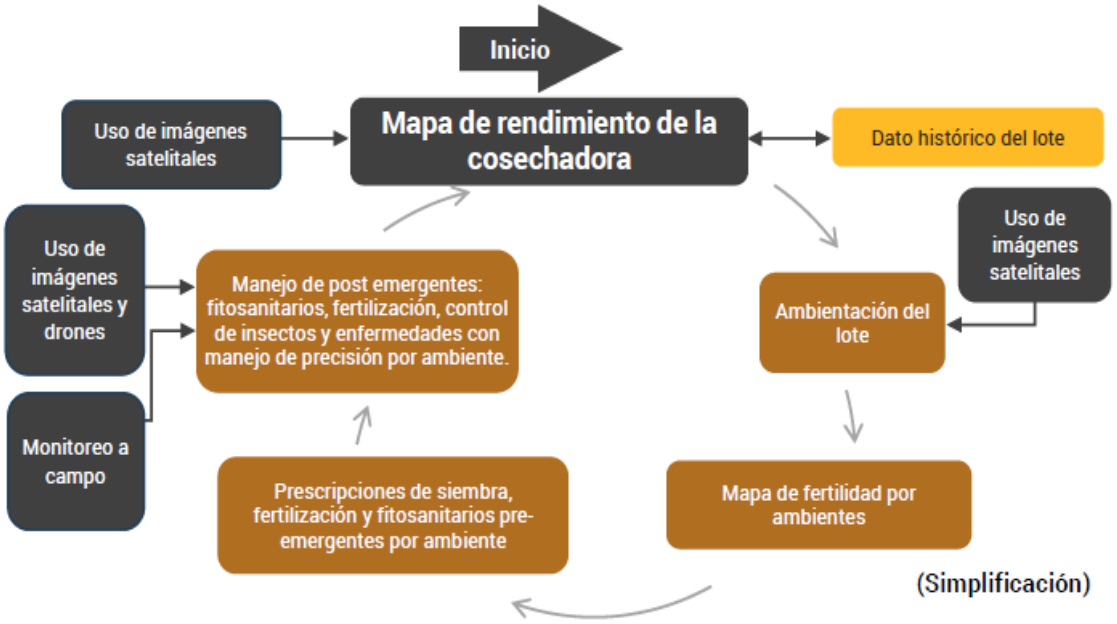
2 RELATO DE EXPERIÊNCIA

2.1 Estado actual: ¿Incorporación o adopción?

Aunque Argentina se posiciona entre los países líderes en la incorporación de tecnologías agrícolas, la adopción plena de la agricultura de precisión en todo su ciclo aún presenta oportunidades de mejora. De acuerdo con informes del BID y el INTA (2024), únicamente 2 de cada 10 productores logran recorrer el proceso completo, desde la captura de datos hasta su transformación en decisiones de manejo (Figura 2).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2 -Esquema de adopción del ciclo completo de Agricultura de Precisión.



Fuente: Layana, E. BID, INTA 2024.

Esta situación evidencia la necesidad de diferenciar entre incorporación (disponibilidad de equipos y sensores) y adopción (uso efectivo de la información en la gestión agronómica) y esto también se ve reflejado a nivel de escala productiva, siendo los productores de menor escala, los de menor porcentaje de adopción. Si bien la mayoría de las cosechadoras, sembradoras y pulverizadoras cuentan con sistemas de monitoreo y dosificación variable, el verdadero salto cualitativo ocurre cuando las empresas agropecuarias logran integrar los datos en información, avanzando así hacia una gestión más precisa y estratégica. Las causas de esta brecha son diversas: insuficiente capacitación y acompañamiento técnico, percepción de complejidad, falta de estandarización en los flujos de información y desconexión entre actores de la cadena productiva.

2.2 El rol del agrónomo: el director de la orquestra

En este escenario, el rol del ingeniero agrónomo resulta central. Su función trasciende de la mera recomendación de insumos o prácticas, para convertirse en el verdadero “director de orquesta” del ecosistema de datos que genera empresa agropecuaria. La misión consiste en transformar grandes volúmenes de datos a información que permitirán planificar decisiones agronómicas precisas, oportunas y asertivas, y, en un horizonte próximo, incluso en decisiones autónomas mediante la incorporación de inteligencia artificial.

Este enfoque se alinea con la concepción moderna de la empresa agropecuaria como un sistema de gestión integrado, en el cual cada actor —productor, familia, asesor, proveedor de insumos, contratistas y operarios de maquinaría precisa— participa en un proceso articulado. Se trata de pasar de una agricultura de precisión entendida como un conjunto de herramientas instrumentales hacia una agronomía de

ISBN 978-65-990392-6-3

precisión, basada en la comprensión profunda de la variabilidad de cada ambiente y lote.

2.3 El contratista rural: un aliado estratégico:

En el sistema agropecuario argentino, los prestadores de servicios constituyen un actor clave e imprescindible dentro de la dinámica productiva. Su participación es determinante en la ejecución de labores: representan entre el 50 y 60% de la superficie en siembra, entre el 70 y 80% en pulverización y cosecha, y superan el 80% en fertilización (Figura 3).

Figura 3 - Participación de los prestadores de servicios.



Fuente: Layana, E. BID, INTA 2024

Estos contratistas, altamente capacitados y equipados con herramientas de avanzada tecnología, no solo garantizan eficiencia operativa, sino que además se convierten en generadores de datos de gran valor. Cada labor realizada produce capas de información que, en muchos casos, permanecen en sus propias organizaciones (plataformas digitales como AGCO FUSE, CNH FieldOps, CLAAS Connect, John Deere Operation Center, FIELDVIEW Climate, ACRONEX Unimap, entre otras) si no se establecen mecanismos de intercambio quedan en manos de contratistas únicamente. Dichos datos constituyen un insumo estratégico para comprender mejor las respuestas de los cultivos, analizar variabilidades y fundamentar futuras decisiones de manejo.

ISBN 978-65-990392-6-3

En este marco, los productores tienen la posibilidad de seleccionar a sus contratistas en función de la calidad de trabajo, la tecnología empleada y la capacidad de brindar un servicio diferencial. A su vez, el contratista puedee posicionarse como un socio digital, certificando sus labores mediante los datos generados por su maquinaria y ofreciendo un valor agregado único.

Esta interacción, basada en la confianza y la gestión compartida de la información, representa una característica distintiva del modelo productivo argentino, dónde el contratista no es solo un prestador de servicios, sino un verdadero amigo, aliado estratégico en la construcción de una agricultura más eficiente, precisa y sostenible.

2.4 Datos para transformar la producción

Una de las principales tendencias actuales en la gestión agrícola es la telemetría, entendida como la capacidad de las máquinas de estar permanentemente conectadas y transmitir información en tiempo real. El avance de esta tecnología responde, por un lado, a la necesidad de las empresas proveedoras de mantener un contacto remoto continuó con sus clientes, ofreciendo un mejor servicio posventa, anticipando fallas mediante alertas preventivas y fortaleciendo la fidelización. Por otro lado, representa para el productor la posibilidad de sentirse acompañado y respaldado por su prestador de servicios técnicos, logrando que la gestión de la maquinaria deje de ser un factor de incertidumbre para convertirse en un proceso monitoreado y controlado.

Más allá de la asistencia operativa, la telemetría permite recolectar datos técnicos y agronómicos de alto valor estratégico. Entre ellos se destacan parámetros como el consumo de combustible, las horas efectivas de trabajo, la productividad operativa (ha/h), la eficiencia de uso de insumos y la calidad y trazabilidad de las labores ejecutadas. Estos indicadores, una vez procesados y analizados, dejan de ser simples registros numéricos para convertirse en información agronómica aplicada, útil para optimizar el manejo de los sistemas productivos y mejorar la eficiencia en la utilización de la maquinaria agrícola.

Por ejemplo, el análisis de mapas de rendimiento en combinación con los datos de siembra y fertilización permite identificar con precisión qué ambientes responden mejor a determinados insumos, posibilitando ajustes finos en las prescripciones para campañas posteriores. Del mismo modo, el registro de fallas mecánicas y tiempos muertos ayuda a planificar un mantenimiento preventivo más eficiente, reduciendo costos de reparación y pérdidas de oportunidad por inactividad operativa de maquinaria que poseen un alto costo que debe ser finamente tratado para ser amortizada lo antes posible.

De acuerdo con estudios realizados por el INTA Manfredi y relevamientos privados, actualmente en Argentina existen más de 22.350 máquinas conectadas, que mapean digitalmente el proceso productivo de más del 70% de las más de 38 millones de hectáreas sembrables del país (Fuente: Scaramuzza, F., 2025). Este nivel de penetración tecnológica constituye una oportunidad inédita para disponer de información de calidad generada a gran escala y utilizarla como insumo clave en la toma de decisiones tanto agronómicas como empresariales.

El verdadero desafío no está solo en generar datos, sino en gestionar el ciclo completo de los mismos:



ISBN 978-65-990392-6-3

- Captura confiable y estandarizada: asegurar que la información recolectada sea precisa y comparable entre equipos y marcas.
- Almacenamiento seguro: contar con plataformas que resguarden los datos evitando pérdidas o manipulaciones indebidas.
- Interoperabilidad: garantizar que los sistemas puedan dialogar entre sí, evitando "islas de información" que limiten la toma de decisiones.
- Analítica avanzada: utilizar herramientas de big data e inteligencia artificial para transformar grandes volúmenes de datos en recomendaciones agronómicas prácticas y predicciones de escenarios productivos.
- Visualización amigable: poner a disposición del productor y del asesor información clara, accesible y útil para el día a día.

Además, emergen nuevos temas que enriquecerán este proceso en los próximos años:

- Trazabilidad y certificaciones: los datos permiten demostrar el origen, las prácticas agronómicas y la huella ambiental de la producción, requisitos cada vez más valorados por los mercados internacionales.
- Ciberseguridad: la creciente digitalización del agro hace necesario proteger la información productiva como un activo estratégico.
- Inclusión digital: garantizar que los pequeños y medianos productores también tengan acceso a estas tecnologías, evitando que la brecha de datos amplíe desigualdades en el sector.
- Ecosistema AgTech: startups y empresas de base tecnológica encuentran en este flujo de información masivo una plataforma para desarrollar nuevas soluciones de monitoreo, predicción climática, gestión financiera y logística.

En síntesis, los datos transforman la producción agropecuaria en conocimiento aplicado, habilitando un manejo más eficiente, predecible y sostenible. Su correcta gestión no solo impacta en la rentabilidad de cada campaña, sino que también sienta las bases para un modelo productivo más competitivo y transparente, alineado con las demandas globales de sostenibilidad y calidad alimentaria.

2.5 Impactos en rentabilidad y sostenibilidad

Los resultados del cambio de enfoque hacia la agricultura de precisión son cada vez más evidentes y cuantificables. La dosificación variable de semillas y fertilizantes no solo permite optimizar el uso de insumos, sino que también maximiza la productividad de cada ambiente dentro de un mismo lote. Estudios realizados en distintas regiones agrícolas de Argentina muestran incrementos de rendimiento en grano de hasta un 15% promedio, con impactos aún mayores en lotes con marcada heterogeneidad ambiental, donde la brecha entre ambientes puede ser del doble o incluso triple respecto de los sectores más homogéneos. Esta mejora en la productividad se traduce en un aumento directo de la rentabilidad, ya que la inversión en insumos se ajusta de manera precisa al potencial real de cada ambiente.

Del mismo modo, las aplicaciones selectivas de fitosanitarios, ya sea mediante sensores o cámaras (Weed-It, WeedSeeker, Occu Weed, EcoSniper, DeepAgro, SaveFarm, entre otros), drones o pulverizaciones sitio-específicas programadas, han

ISBN 978-65-990392-6-3

demostrado ser una herramienta clave para mejorar la eficiencia económica y ambiental. Los ahorros en herbicidas alcanzan en promedio un 70%, con picos que superan esa cifra en situaciones de barbecho químico, superan el 90% de ahorro. Estos resultados no solo reducen el costo operativo, sino que disminuyen de manera significativa la huella ambiental de la agricultura, favoreciendo la conservación de la biodiversidad y reduciendo el riesgo de resistencia de malezas.

A ello se suma el impacto positivo en la eficiencia energética. El uso de piloto automático, cortes automáticos de sección y ruteo inteligente de maquinaria permiten reducir superposiciones y, en consecuencia, ahorrar combustible, insumos y horas de trabajo, logrando alta productividad (ha/h). Estas prácticas, que a simple vista parecen menores, representan ahorros acumulados de gran importancia a escala de campaña, y contribuyen a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, un aspecto cada vez más valorado en los mercados internacionales.

En términos de sostenibilidad, la agricultura de precisión permite avanzar hacia un modelo de intensificación sostenible, donde se busca producir más con menos recursos. La gestión eficiente del agua, temática en crecimiento en argentina, por ejemplo, mediante el uso de la tecnología de riego variable o monitoreo remoto de humedad en suelo, abre nuevas posibilidades para mejorar la productividad en zonas semiáridas, al tiempo que contribuye a la conservación de este recurso crítico, aumentando significativamente los niveles productivos.

Las claves del éxito no se limitan a la tecnología en sí, sino a la gestión del conocimiento y los datos, que permiten el manejo optimizado de los recursos. La capacitación continua, la estandarización en la recolección y almacenamiento de información digitalizada, y el uso de plataformas digitales que integren mapas de rendimiento, imágenes satelitales y prescripciones de manejo permiten cerrar la brecha de rendimiento entre lo alcanzado y lo posible. Este proceso requiere de un cambio cultural en el productor y su equipo, incorporando la mirada de que el dato no es un subproducto de la actividad agrícola, sino un activo estratégico de gestión.

El impacto económico no termina en el grano cosechado. La transformación de granos en carne, leche o huevos multiplica el retorno económico, dado que la eficiencia lograda en la producción de forraje y granos repercute en la calidad y cantidad de proteína animal producida. Esto refuerza la visión de una agricultura más integrada y circular, donde los subproductos pueden volver al sistema como insumos (ejemplo: efluentes para fertilización orgánica), generando un círculo virtuoso de productividad y sustentabilidad, temas que supo poner el INTA en juego.

Finalmente, es importante sumar algunos ejes emergentes que reforzarán el impacto de estas prácticas en el futuro:

- Trazabilidad y certificaciones ambientales: cada vez más demandadas por los mercados internacionales.
- Reducción de huella de carbono: alineada con los compromisos globales de mitigación del cambio climático.
- Inclusión de pequeños y medianos productores: evitando que la brecha tecnológica amplíe desigualdades en el sector, e incentivando a un mayor % de uso por parte de ellos.
- Uso de inteligencia artificial y analítica avanzada: para pasar de la simple recolección de datos, al desarrollo de sistemas predictivos y prescriptivos.
- Economía circular y bioeconomía: aprovechamiento de residuos de la producción y co-productos agrícolas como fuente de energía o fertilización.



ISBN 978-65-990392-6-3

En síntesis, la agricultura de precisión en Argentina no solo representa un incremento en la rentabilidad, sino que consolida un modelo productivo más eficiente, resiliente y sostenible en el tiempo. La conjunción de beneficios económicos, ambientales y sociales la posiciona como un camino imprescindible para enfrentar los desafíos de la agricultura del futuro.

2.6 IPerspectivas y avances futuros

El futuro de la agricultura argentina está íntimamente ligado a la adopción plena y efectiva de las tecnologías de precisión y de los sistemas digitales que las acompañan. No se trata únicamente de incorporar equipamiento o sensores, sino de generar un ecosistema donde la tecnología, el conocimiento y los productores estén articulados de manera sinérgica. En este escenario, el asesor técnico debe posicionarse como actor central y líder del proceso de transformación digital, capaz de traducir los datos en decisiones agronómicas que impacten de manera positiva en la rentabilidad y en la sustentabilidad del sistema productivo.

La difusión del conocimiento y la formación de recursos humanos especializados constituyen pilares estratégicos. Tal como lo hizo históricamente el INTA en su rol de institución pionera, el desafío es sostener y profundizar la tarea de educar, capacitar y acompañar a los distintos actores de la cadena. Será necesario continuar derribando mitos en torno a la complejidad y el costo de estas tecnologías, mostrando de manera clara el retorno económico, productivo y ambiental que representan. En este sentido, la creación de programas de extensión y de capacitación continua, así como la vinculación entre universidades, institutos de investigación y empresas privadas, se presenta como una condición indispensable para poder avanzar en un plan de incrementar el % de adopción por parte de las unidades productivas.

Otro aspecto determinante será, la consolidación de una cultura de innovación que atraviese todo el sector agropecuario. No basta con disponer de herramientas de última generación: se requiere una mentalidad abierta al cambio, donde el productor vea en la digitalización no una obligación externa, sino una oportunidad para gestionar mejor sus recursos, reducir riesgos y aumentar la competitividad.

Asimismo, la formación académica en agronomía de precisión deberá ampliarse, integrando contenidos de ingeniería, informática, estadística, inteligencia artificial y ciencias ambientales. Este enfoque multidisciplinario permitirá contar con profesionales capaces de interpretar datos, diseñar estrategias de manejo sitio-específicas, evaluar el impacto ambiental y garantizar trazabilidad, contribuyendo a una agricultura más transparente y sostenible. A la vez, será una oportunidad de contar con recursos humanos capacitados para formar parte de grandes equipos de innovación tecnológica en pos de una agricultura más sostenible y productiva.

En paralelo, las empresas de servicios y contratistas rurales seguirán cumpliendo un rol estratégico como verdaderos eslabones de la cadena de valor. Su capacidad de inversión en maquinaria de última generación y su llegada territorial los convierten en socios indispensables para democratizar el acceso a estas tecnologías, especialmente en un país con estructuras productivas tan diversas como la Argentina.

Finalmente, resulta necesario incorporar al debate algunas dimensiones emergentes:



ISBN 978-65-990392-6-3

- La gestión de datos y su gobernanza, garantizando estándares de interoperabilidad y reglas claras de propiedad intelectual.
- La sostenibilidad ambiental y social, con prácticas que respondan tanto a las exigencias de los mercados internacionales como a la responsabilidad local en el uso de recursos naturales.
- La integración con políticas públicas, que acompañen con incentivos, financiamiento y marcos regulatorios adecuados la adopción tecnológica.
- La inclusión digital de pequeños y medianos productores, evitando que la brecha tecnológica amplíe desigualdades en el acceso a la innovación.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

En conclusión, el futuro de la agricultura de precisión en Argentina dependerá no solo de la tecnología disponible, sino de la capacidad colectiva de articular conocimiento, inversión, innovación y políticas públicas. Solo de esta manera será posible alcanzar un modelo productivo más competitivo, sustentable, sostenible y tecnológicamente avanzado, capaz de responder a los desafíos globales y, al mismo tiempo, generar oportunidades de desarrollo local, brindando mano de obra calificada para avanzar con servicios de alta performance.

REFERÊNCIAS

LAYANA, E. **Implementación de la Agricultura de Precisión en Zonas Núcleo: Estrategias de Formación para la Mejora de la Empleabilidad y el Desarrollo Económico,** 2024. Disponible en https://www.gfa-group.de/

SCARAMUZZA, F. **Agtech en el campo**: datos, precisión e innovación en siembra y pulverización para una agricultura sustentable y productiva… Una ruta hacia la eficiencia, la rentabilidad y la sostenibilidad, 2025. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=3C5CZnNcMT0&list=PLpYmwneuya779kgP1aJAWoXHi_L_P83rB&index=1&t=20s

SCARAMUZZA, F.; VILARROEL D. **Estimación de la evolución en la adopción de componentes de Agricultura de Precisión 2020/24**. Actas del 20 Congreso de Agricultura de Precisión 20-21 de agosto de 2024 Manfredi, Córdoba, Argentina, 2024. Disponible en https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2024/07/20o_congreso_ap__programa_1.pdf

ISBN 978-65-990392-6-3

ÁREA TEMÁTICA: MANEJO ESPECÍFICO DE SÍTIO DE SOLO E PLANTA

CAPÍTULO 5

EFEITOS DA APLICAÇÃO DE FUNGOS MICORRÍZICOS NA CULTURA DA SOJA EM ANO DE ESTRESSE HÍDRICO

Mycorrhizal fungi application effects soybean crops in a water stress year

Danilo da Costa Soares[1a]; Eduardo Leonel Bottega[2,3]*; Gabriel Mergen Rohrs[3]; Zanandra Boff de Oliveira[2,3]; Telmo Jorge Carneiro Amado[2]; Alberto Eduardo Knies[4]; Gustavo Bock Bernhard[3]; Carlos Eduardo da Silva[3]

[1] Eng. Agrônomo, Mestre em Agricultura de Precisão (PPGAP /UFSM), Consultor Técnico Autônomo, R. Caldas Junior 1179 – Martini, 99470-000, Não-Me-Toque – RS, Brasil, danilocostasoares7@gmail.com
[2] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Colégio Politécnico (UFSM-POLI), Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão (PPGAP), Av. Roraima 1000 – Camobi, 97105-000, Santa Maria – RS, eduardo.bottega@ufsm.br, zanandra.oliveira@ufsm.br, proftelmoamado@gmail.com
[3] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), campus de Cachoeira do Sul, Rod. Taufik Germano 3013 – Universitário II, 96503-205, Cachoeira do Sul – RS, Brasil, gabriel.rohrs@acad.ufsm.br, gustavo.bernhard@acad.ufsm.br, dasilvakadu03@gmail.com
[4] Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), R. Sete de Setembro 1040 – Centro, 96508-010, Cachoeira do Sul – RS, Brasil, alberto-knies@uergs.edu.br
[a] Parte da dissertação de mestrado em Agricultura de Precisão (PPGAP/UFSM); *Autor correspondente:

RESUMO

Objetivou-se estudar o efeito da aplicação de diferentes doses de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) sobre os componentes de rendimento e resposta espectral da cultura da soja em ano de estresse hídrico. O trabalho foi conduzido na safra 2021/2022 no município de Tapera-RS. O agente biológico utilizado foi o fungo micorrízico arbuscular (FMA) *Rhizophagus intraradices* (20.800 propágulos por grama). A cultivar de soja utilizada foi a BMX Ativa. Foram implantados dois experimentos. No experimento 1 foram estudados 3 tratamentos; T1: padrão produtor (250 ml ha^{-1} de *Bradyrhizobium japonicum* + 200 ml ha^{-1} de *Azospirillum brasilense*); T2: T1 + 120g ha^{-1} de FMA e T3: testemunha (sem aplicação de biológicos). No experimento 2 foram estudados 4 tratamentos; T1: testemunha; T2: 96 g ha^{-1} de FMA; T3: 120 g ha^{-1} de FMA e T4: 144g ha^{-1} de FMA. No experimento 1, o tratamento T2 incrementou o peso de mil grãos, representando um ganho de 17,65% (27g). No experimento 2, o tratamento T4 incrementou o número de vagens por planta e no número de grãos por vagem.

Palavras-chave: *Rhizophagus* sp. Soja. Plantio direto.

ABSTRACT

The objective was to study the effect of applying different doses of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the yield components and spectral response of soybean crops in a year of water stress. The study was conducted during the 2021/2022 harvest in the municipality of Tapera, RS. The biological agent used was the arbuscular mycorrhizal fungus (AMF) *Rhizophagus intraradices* (20,800 propagules per gram). The soybean cultivar BMX Ativa was used. Two experiments were implemented. In experiment 1, three treatments were studied: T1: producer

standard (250 ml ha^{-1} of *Bradyrhizobium japonicum* + 200 ml ha^{-1} of *Azospirillum brasilense*); T2: T1 + 120 g ha^{-1} of AMF; and T3: control (no biological application). In experiment 2, four treatments were studied: T1: control; T2: 96 g ha^{-1} of AMF; T3: 120 g ha^{-1} of AMF and T4: 144 g ha^{-1} of AMF. In experiment 1, treatment T2 increased the weight of a thousand grains, representing a gain of 17.65% (27 g). In experiment 2, treatment T4 increased the number of pods per plant and the number of grains per pod.

Keywords: *Rhizophagus* sp. Soybean. No-Till.

1 INTRODUÇÃO

A soja é, atualmente, a quarta cultura de grãos, mais importante do mundo, superada, nesta ordem pelo milho, trigo e arroz. No Brasil é a principal cultura em área cultivada e produção de grãos, o primeiro produtor mundial e o primeiro país exportador dessa aleuro-oleaginosa (FLOSS, 2021). O cultivo da soja no Brasil tem crescido gradativamente a cada ano. Dentre os principais fatores que contribuem para esse aumento estão os avanços tecnológicos, práticas de manejo sustentável e eficiência dos produtores. Da área de 73,8 milhões de hectares cultivados com as principais culturas no país, aproximadamente 55,49% (40,95 milhões de hectares) destinam-se à produção de soja. No estado do Rio Grande do Sul a área cultivada é de 6,358 milhões hectares. A produção de soja no Brasil na safra 2021/2022 foi de 124 milhões de toneladas 10,2% inferior a safra 2020/2021, e a produtividade média alcançada foi de 3.029 kg ha^{-1} (CONAB, 2022).

O cenário atual da agricultura globalizada possui alta competitividade, isso obriga os agricultores a buscar por opções que diminuam os custos de produção, reduzam o risco de perdas, aumentem a qualidade dos grãos e, principalmente, a produtividade (FARIAS et al. 2007). Segundo EMBRAPA (2010) para o desenvolvimento do grão de soja há necessidade de quantidades ideais de nutrientes como o nitrogênio, potássio, fósforo, enxofre e o cálcio. A falta de nutrientes no solo pode refletir na lavoura, causando: menor quantidade de proteínas, afetando o florescimento e o crescimento da cultura, resistência à doenças, menor desenvolvimento vegetativo, senescência precoce, diminuição do crescimento e morte de raízes (MALAVOLTA 2006).

Estudos recentes têm demonstrado que o alto potencial de rendimento está intimamente relacionado com o rendimento biológico (total de biomassa), ou seja, parte dos fotoassimilados formados na pré-antese são transferidos aos órgãos de armazenamento após a antese. O restante da biomassa é sintetizado durante a pós-antese. Os componentes de rendimento variam de cultura para cultura, na soja o rendimento pode ser estimado pelo produto do número de plantas por área; número de vagens por planta; número de grãos por vagem e peso individual de grãos (FLOSS, 2004). Uma estratégia para potencializar o rendimento da cultura é a utilização de fungos micorrízicos arbusculares.

A soja pode formar simbiose com *Bradyrhizobium* e com fungos micorrízicos arbusculares (FMA). Estes sistemas simbióticos aumentam o crescimento da planta por meio do suprimento de nitrogênio (N) e fósforo (P). Tem sido considerado que o efeito benéfico exercido pelos fungos micorrízicos na fixação simbiótica do N está relacionado ao suprimento de P para os nódulos. Estudo conduzido por Wilson et al. (2009) demonstrou que a fertilização com N promoveu o aumento de hifas de FMA do

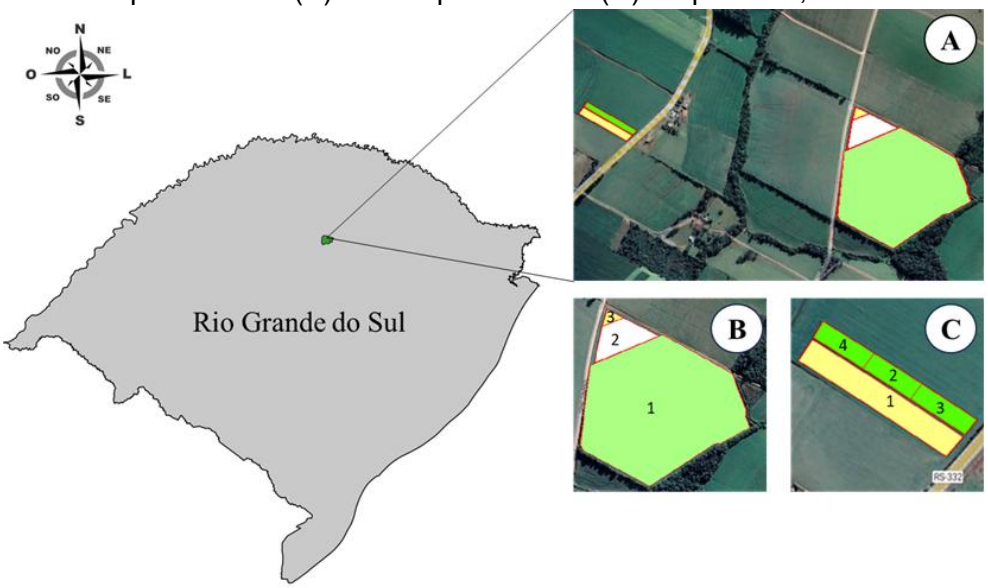
solo, *pools* de proteínas do solo relacionadas à glomalina e macroagregados estáveis em água enquanto as aplicações de fungicidas reduziram as hifas de FMA, glomalina e macroagregados estáveis em água.

Rotação de culturas e variações sazonais podem promover alterações quantitativas e qualitativas na comunidade de fungos micorrízicos arbusculares nativos e na formação da micorriza arbuscular. A presença dos fungos no solo contribuiu no crescimento da soja em 53%. A cultura e o sistema de cultivo são fatores determinantes para o enriquecimento do sistema com micorriza arbuscular (MIRANDA et al. 2005). Práticas agrícolas que possibilitam maior diversidade de plantas por área favorecem a presença de fungos micorrízicos, um importante parâmetro biológico indicador da qualidade do solo (PORTO et al. 2003). Com base no exposto, este trabalho objetivou estudar o efeito da aplicação de diferentes doses de fungos micorrízicos arbusculares (FMA), aplicadas na semeadura, sobre os componentes de rendimento e resposta espectral da cultura da soja em ano de estresse hídrico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no município de Tapera, na região do planalto médio do estado do Rio Grande do Sul, em duas áreas comerciais (experimento 1 e experimento 2) de diferentes proprietários. Nas duas propriedades a semeadura da cultura da soja foi realizada em sistema de plantio direto na palhada. Na Figura 1 é apresentada a localização das áreas comerciais (Figura 1A) onde foram implantados os experimentos 1 (Figura 1B) e 2 (Figura 1C).

Figura 1 – Localização das áreas experimentais (A). Polígonos e tratamentos do experimento 1 (B) e do experimento 2 (C). Tapera/RS, 2022.



Legenda: Figura 1B: 1 – tratamento T1 (padrão produtor: 250 ml ha^{-1} de produto com *Bradyrhizobium japonicum* na concentração de 7 x 109 UFC ml^{-1} + 200 ml ha^{-1} de produto com *Azospirillum brasilense* na concentração de 3 x 108 UFC ml^{-1}); 2 – T1 + 120 g ha^{-1} de FMA e 3 – testemunha (sem aplicação). Figura 1C: 1 – Testemunha (sem aplicação); 2 – Aplicação de 96 g ha^{-1} de FMA; 3 – Aplicação de 120 g ha^{-1} de FMA e 4 – Aplicação de 144 g ha^{-1} de FMA.
Fonte: Adaptado de Soares (2022).

ISBN 978-65-990392-6-3

O talhão onde foi implantado o experimento 1 (Figura 1B) apresenta coordenadas geográficas centrais 28°35'58,10" de latitude Sul e 52°51'07,35" de longitude Oeste. Possui 13,5 hectares, destes, 12 hectares foram conduzidos no padrão do produtor, 01 (um) hectare de tratamento com FMA e 0,5 hectare de testemunha. A análise dos teores médios de nutrientes no solo, na camada 0-20 cm, apresentou os seguintes resultados: Argila: 26%; pH em água: 5,57; índice SMP: 6,48; fósforo: 41,3 mg dm³; potássio: 176 mg dm³; matéria orgânica: 2,6%; alumínio trocável: 0,00 $cmol_c$ dm³; cálcio: 5,94 $cmol_c$ dm³; magnésio: 2,12 $cmol_c$ dm³; H+Al: 2,51 $cmol_c$ dm³; CTC pH7: 11,02 $cmol_c$ dm³; saturação de bases: 77,22%.

O experimento 1 foi implantado no dia 28 de outubro de 2021. Foi semeada a cultura da soja, cultivar BMX Ativa. O espaçamento adotado entre as linhas de semeadura foi de 50 cm. A população de plantas planejada foi de 262.000 plantas por hectare. A semeadura foi realizada de forma direta, sob resteva de canola, utilizou-se no momento da semeadura 250 kg ha^{-1} do fertilizante Top Phos 280 e 200 kg ha^{-1} de cloreto de potássio (KCl) a lanço cinco dias antes da semeadura.

O agente biológico utilizado no experimento 1 foi o fungo micorrízico arbuscular (FMA) *Rhizophagus intraradices*. Foi utilizado produto comercial Rootella BR® com concentração de 20.800 propágulos por grama, sendo este produzido e importado de Israel. Os tratamentos implantados neste experimento foram: T1: padrão produtor, constituído da aplicação de *Bradyrhizobium japonicum* na concentração de 7 x 109 UFC (Unidade de Formação de Colônia) ml^{-1} sendo utilizados 250 ml ha^{-1} (5 doses) e *Azospirillum brasilense* na concentração de 3 x 108 UFC ml^{-1} sendo utilizados 200 ml ha^{-1} (duas doses). T2: T1 + 120 g ha^{-1} FMA (1 dose). T3: testemunha (sem aplicação de biológicos). A aplicação dos fungos micorrízicos foi realizada colocando o produto juntamente com os demais agentes biológicos no inoculador de sulco.

O talhão onde foi implantado o experimento 2 (Figura 1C) apresenta coordenadas centrais 28°35'57,45" de latitude Sul e 52°51'40,57" de longitude Oeste. Possui 5,5 hectares, destes, 0,5 hectares serviram de testemunha e em 0,39 hectares foi aplicado o tratamento com FMA. A análise dos teores médios de nutrientes no solo, na camada 0-20 cm, apresentou os seguintes resultados: Argila: 28%; pH em água: 6,52; índice SMP: 6,78; fósforo: 22,4 mg dm³; potássio: 144 mg dm³; matéria orgânica: 3,3%; alumínio trocável: 0,00 cmol dm³; cálcio: 8,39 $cmol_c$ dm³; magnésio: 3,09 $cmol_c$ dm³; H+Al: 1,78 $cmol_c$ dm³; CTC pH7: 13,63 $cmol_c$ dm³; saturação de bases: 86,93%. Em ambas as áreas o solo é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico (EMBRAPA 2018).

O experimento 2 foi implantado no dia 20 de novembro de 2021. A inoculação do agente biológico foi realizada diretamente na semente de forma manual na própria embalagem, pouco antes de adicioná-la nas caixas de sementes da semeadora-adubadora. Foi semeada a cultura da soja, cultivar BMX Ativa. O espaçamento entre linhas de cultivo foi de 45 cm. A população de plantas planejada foi de 297.700 plantas por hectare.

A semeadura foi realizada de forma direta, sob resteva de aveia preta, utilizou-se no momento da semeadura 312 kg ha^{-1} do fertilizante formulado 07-29-07 e 200 kg ha^{-1} de cloreto de potássio (KCl) a lanço quatro dias antes da semeadura. Todas as parcelas foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* na concentração de 7 x 109 UFC ml^{-1} sendo utilizados 100 ml ha^{-1} (2 doses). O agente biológico utilizado foi fungo micorrízico arbuscular (FMA) *Rhizophagus intraradices*, a partir da aplicação do produto comercial Rootella BR®. Os tratamentos implantados foram constituídos da

aplicação de diferentes doses, sendo eles: T1: testemunha (sem aplicação de FMA). T2: Dose padrão de FMA menos 20%: 96 g ha^{-1}. T3: Dose padrão de FMA: 120 g ha^{-1}. T4: Dose padrão de FMA mais 20%: 144 g ha^{-1}.

Na avaliação dos componentes de rendimento da cultura da soja, foram colhidas, manualmente, quatro amostras de plantas, representativas da área de 4 m^2, em cada parcela experimental. Para a colheita manual foi utilizada tesoura de poda. Cada parcela colhida foi agrupada e identificada. Posteriormente procedeu-se com as avaliações.

Para quantificar o número de vagens por planta (NVP), foram retiradas todas as vagens de 10 plantas de cada parcela, depois se contou o número de vagens. O número de grãos por vagens (NGV) foi obtido a partir da contagem de grãos das vagens utilizadas no cômputo do número de vagens por planta, debulhando-as de forma manual. O peso de mil grãos (PMG, g) foi obtido pesando-se mil grãos. A produtividade (PRD, kg ha^{-1}) foi estimada a partir da pesagem dos grãos colhidos em cada parcela, extrapolando-se o valor obtido para kg ha^{-1}, posteriormente corrigiu-se este valor descontando a umidade, adotando-se como padrão a umidade de 13%.

Os valores obtidos na avaliação dos componentes de rendimento compuseram o banco de dados utilizados nas análises estatísticas subsequentes. Em um primeiro momento, os valores de NVP, NGV, PMG e PRD foram submetidos à análise estatística descritiva, indicando os valores de mínimo e máximo e calculando-se a média, o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (CV%). Os valores médios obtidos para NVP, NGV, PMG e PRD, para ambos os experimentos, foram submetidos a análise de variância, aplicando-se o teste F ao nível de 5% de probabilidade.

O delineamento experimental adotado para análise dos resultados observados no experimento 1 foi o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), com 4 repetições. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p<0,05$). O experimento 2, por estudar a aplicação de diferentes doses, foi avaliado empregando análise de regressão linear simples, sendo os coeficientes b0 e b1, testados pelo teste t de student ($p<0,05$). Todas as análises foram desenvolvidas no programa SISVAR (FERREIRA, 2011).

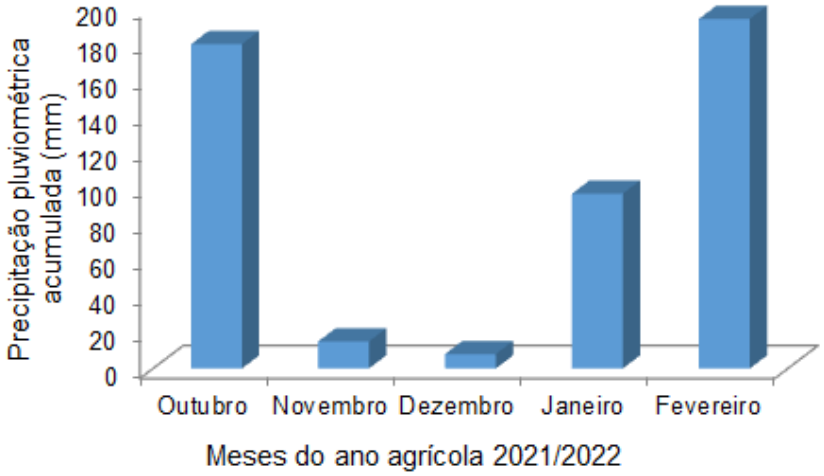
A resposta espectral da cultura da soja em função dos tratamentos aplicados foi avaliada a partir do mapeamento da variabilidade espacial do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). O mapeamento do NDVI foi realizado no Sistema de Informação Geográfica (SIG) Quantum GIS (QGIS), versão 3.10.11 (A Coruña). Utilizando o plug-in Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) foi realizado o download das imagens do sensor orbital Sentinel-2. As bandas utilizadas no cálculo do NDVI foram a banda do vermelho (RED, banda 4) e a banda do infravermelho próximo (NIR, banda 8). O plug-in permite a filtragem das imagens com base em um percentual de nuvens, assim, adotou-se o limiar de 20% de nuvens como critério para seleção das imagens. Foram obtidas imagens das áreas de estudo para o período de novembro de 2021 à janeiro de 2022, buscando assim caracterizar as diferenças na biomassa da cultura em função da aplicação dos tratamentos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No ano agrícola 2021/2022, no município de Tapera-RS, foi registrado déficit hídrico para os meses de novembro e dezembro de 2021, meses em que a cultura da

soja se encontrava nas fases de germinação e crescimento vegetativo. De acordo com Pilau et al. (2023) a necessidade hídrica da cultura da soja é alta, especialmente em determinadas fases do desenvolvimento, como a germinação, o crescimento vegetativo e a formação de grãos. Os autores destacam que durante a fase de crescimento vegetativo, a disponibilidade de água é fundamental para o desenvolvimento das folhas, caules e raízes, os quais influenciam diretamente a eficiência da planta em realizar a fotossíntese. Na Figura 2 é apresentado o gráfico da precipitação pluviométrica acumulada para os meses do ano agrícola 2021/2022 no município de Tapera/RS.

Figura 2 – Gráfico da precipitação pluviométrica acumulada para os meses do ano agrícola 2021/2022. Tapera/RS, 2022.



Fonte: Cotrisoja (2022).

3.1 Experimento 1

Na Tabela 1 é apresentado o resumo estatístico descritivo para o número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), peso de mil grãos (PMG) e produtividade de soja (PRD) em função dos tratamentos estudados. O valor médio da testemunha sempre foi menor que os valores médios dos tratamentos, para todos os componentes de produtividade avaliados e para a produtividade da soja. Estudos conduzidos por Dias e Andrade (2018), demonstraram que o uso de FMA aumentou a produtividade, quando comparado ao tratamento controle, sem influenciar no crescimento da planta, não havendo aumento nos valores da massa seca.

Embora os valores médios observados para os componentes de rendimento número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV) e produtividade (PRD), terem sido maiores que os valores observados para a testemunha, os mesmos não apresentaram diferença estatística significativa pelo teste F na análise de variância. Apenas a média observada para o peso de mil grãos (PMG) apresentou diferença estatística significativa. Na Tabela 2 é apresentado o resultado do teste de médias para o PMG. O tratamento Padrão + Micorriza foi o que apresentou maior PMG, equivalente a 180 g.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 1 – Estatística descritiva para o número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), peso de mil grãos (PMG) e produtividade de soja (PRD) em função dos tratamentos estudados. Tapera/RS, 2022.

	Tratamentos	Mínimo	Média	Máximo	σ	CV(%)
NVP	Padrão	22,80	28,90	33,00	4,37	15,12
	Padrão + Micorriza	28,10	30,65	34,40	2,75	8,98
	Testemunha	20,70	25,50	27,90	3,35	13,14
	Tratamentos	**Mínimo**	**Média**	**Máximo**	**σ**	**CV(%)**
NGV	Padrão	2,10	2,19	2,28	0,07	3,37
	Padrão + Micorriza	2,08	2,24	2,40	0,13	6,01
	Testemunha	1,92	2,04	2,28	0,17	8,20
	Tratamentos	**Mínimo**	**Média**	**Máximo**	**σ**	**CV(%)**
PMG	Padrão	151,31	154,06	158,33	3,04	1,97
	Padrão + Micorriza	165,75	180,00	189,40	11,50	6,39
	Testemunha	149,65	153,10	158,82	4,04	2,64
	Tratamentos	**Mínimo**	**Média**	**Máximo**	**σ**	**CV(%)**
PRD	Padrão	1.265,35	1.355,49	1.541,68	126,14	9,31
	Padrão + Micorriza	1.429,35	1.605,97	1.753,50	154,47	9,62
	Testemunha	1.013,58	1.329,17	1.550,90	254,62	19,16

σ: desvio padrão.
Fonte: Adaptado de Soares (2022).

De acordo com Oliveira et al. (2019), plantas de soja quando associadas com FMA e cultivadas em condição não irrigada, obtiveram maior produtividade do que plantas no sistema irrigado, além de maior peso de mil grãos. A associação micorrízica promove um maior aporte nutricional e de água para a planta, as hifas aumentam a superfície de contato da planta (raízes) com o solo, pois são muito mais numerosas que as raízes das plantas e conseguem explorar locais onde raízes não conseguem. Isso favorece o desenvolvimento das plantas, mesmo em anos secos, dada a maior capacidade de buscar por nutrientes, possibilitando um acréscimo no enchimento de grãos, consequentemente um maior peso de grãos (OLIVEIRA et al. 2019).

Tabela 2 – Teste de médias Tukey para o peso de mil grãos (PMG) em função dos tratamentos estudados. Tapera/RS, 2022.

Tratamentos	Peso de mil grãos (g)
Padrão	154,06 b
Padrão + Micorriza	180,00 a
Testemunha	153,10 b
DMS = 14,332	Erro padrão: 3,627

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. DMS: diferença mínima significativa.
Fonte: Adaptado de Soares (2022).

ISBN 978-65-990392-6-3

3.2 Experimento 2

Na Tabela 3 é apresentado o resultado da estatística descritiva para o número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), peso de mil grãos (PMG) e produtividade de soja (PRD) em função das doses aplicadas.

Tabela 3 – Estatística descritiva para o número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), peso de mil grãos (PMG) e produtividade de soja (PRD) em função das doses de FMA aplicadas. Tapera/RS, 2022.

	Doses (g ha^{-1})	Mínimo	Média	Máximo	σ	CV(%)
NVP	0	21,60	22,48	23,70	0,97	4,32
	96	34,40	39,03	43,10	3,57	9,16
	120	38,70	44,63	50,50	5,35	11,99
	144	36,80	42,03	50,00	6,36	15,13
	Doses (g ha^{-1})	**Mínimo**	**Média**	**Máximo**	**σ**	**CV(%)**
NGV	0	2,14	2,29	2,38	0,11	4,59
	96	2,50	2,62	2,80	0,13	4,95
	120	2,58	2,69	2,74	0,08	2,81
	144	2,72	2,77	2,84	0,05	1,82
	Doses (g ha^{-1})	**Mínimo**	**Média**	**Máximo**	**σ**	**CV(%)**
PMG	0	140,70	169,25	187,00	20,38	12,04
	96	160,02	177,52	191,45	13,29	7,49
	120	172,08	186,25	193,44	9,72	5,22
	144	160,54	177,66	190,74	12,94	7,28
	Doses (g ha^{-1})	**Mínimo**	**Média**	**Máximo**	**σ**	**CV(%)**
PRD	0	2.913,95	2.977,38	3.008,15	43,28	1,45
	96	3.064,04	3.161,52	3.286,74	93,70	2,96
	120	2.867,26	3.286,84	3.625,25	313,76	9,55
	144	2.766,54	3.177,54	3.679,86	379,07	11,93

σ: desvio padrão.
Fonte: Adaptado de Soares (2022).

Foi possível observar que os maiores valores médios, exceto para a variável NGV, foram obtidos para a aplicação da maior dose (144 g ha^{-1}). Estudos de campo conduzidos por Miranda e Miranda (1997), observaram aumento de cerca de 200 kg ha^{-1} de grãos de soja em função da utilização de micorriza arbuscular. Além disso, houve efeito residual na produtividade no segundo ano de cultivo. As validações agronômicas mostraram que, com a aplicação do fungo para a cultura da soja, o incremento médio de produção de grãos foi de 25% (MAIS SOJA, 2018).

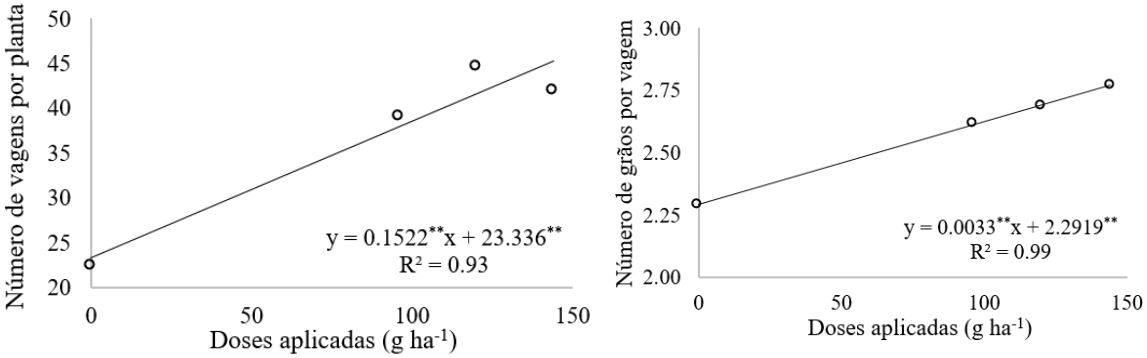
Os componentes de rendimento: peso de mil grãos (PMG) e produtividade (PRD), não apresentaram diferença estatística significativa pela análise de variância. Foi observada diferença significativa apenas para o número de vagens por planta (NVP) e número de grãos por vagem (NGV) em função das doses aplicadas.

Na Figura 6 são apresentados os modelos de regressão para o número de vagens por planta e número de grãos por vagem, em função das doses aplicadas. O modelo linear foi o que melhor representou os valores médios observados para NVP e NGV em função das doses aplicadas, apresentando coeficientes significativos ao nível

ISBN 978-65-990392-6-3

de 1% de probabilidade, indicando que, ao aumentar a dose de FMA, aumentaram também o número de vagens por planta e o número de grãos por vagem.

Figura 3 – Regressão linear para o número de vagens por planta (A) e para o número de grãos por vagem (B), em função das doses de FMA aplicadas. Tapera/RS, 2022.



A B

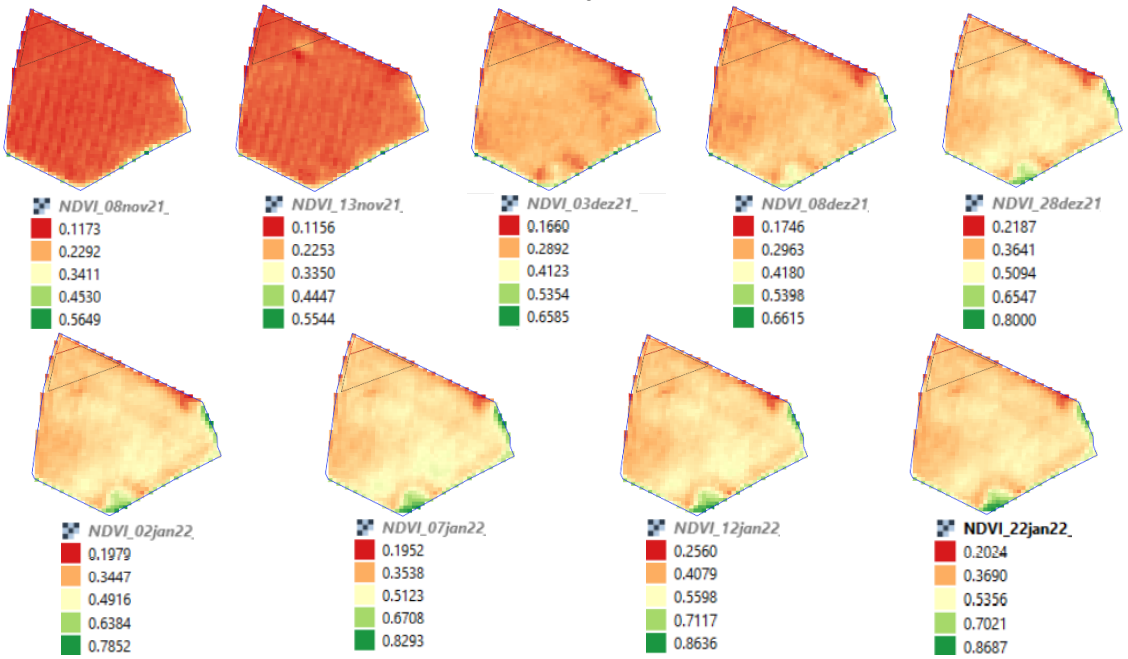
Legenda: **coeficiente significativo ao nível de 5% de probabilidade.
Fonte: Adaptado de Soares (2022).

O incremento no número de vagens por planta e no número de grãos por vagem, em função do aumento na dose de FMA pode ser resultante da associação simbiótica entre fungos e raízes, favorecendo o desenvolvimento de plantas em ambientes com baixa disponibilidade de nutrientes e água no solo, conforme destacado em estudo conduzido por Quiñónez et al. (2018). Os autores enfatizam que, na relação mutualística entre fungo e raiz, há uma troca recíproca de benefícios: a planta fornece nutrientes essenciais aos fungos, enquanto as hifas do fungo atuam como extensões do sistema radicular.

Berbara et al. (2006), destacam que a relação simbiótica entre fungos micorrízicos e plantas é vista como uma associação mutualista de caráter nutricional, na qual a planta fornece ao fungo energia derivada da fotossíntese para seu crescimento e sustento, enquanto o fungo oferece à planta água e nutrientes essenciais. Essa relação é ainda mais expressiva em situações de déficit hídrico. Esse fato pode ser explicado pela penetração das hifas do fungo nas raízes, formando uma espécie de extensão dessas estruturas (MATHUR et al., 2018).

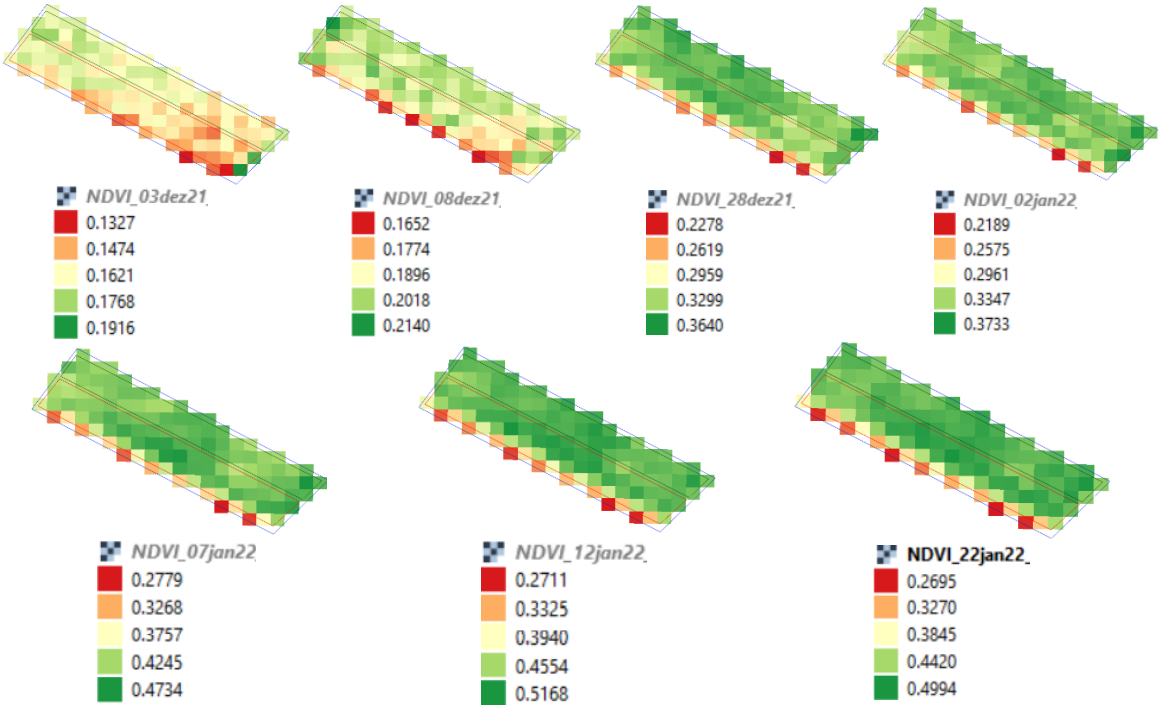
Nas Figuras 7 e 8 são apresentados os mapas temáticos da variabilidade espacial do NDVI. Não foi possível identificar diferenças visuais nos mapas de NDVI em função dos tratamentos estudados. Uma hipótese para este resultado é relacionada à escassez de chuva durante o período de desenvolvimento da cultura da soja, o que pode ter influenciado na fisiologia da planta e consequentemente impactado na biomassa da parte aérea.

Figura 4 – Mapas temáticos da variabilidade espacial do NDVI na área do experimento 1, no período de novembro de 2021 à janeiro de 2022. Tapera/RS, 2022.



Fonte: Adaptado de Soares (2022).

Figura 5 – Mapas temáticos da variabilidade espacial do NDVI na área do experimento 2, no período de dezembro de 2021 à janeiro de 2022. Tapera/RS, 2022.



Fonte: Adaptado de Soares (2022).

ISBN 978-65-990392-6-3

4 CONCLUSÃO

No experimento 1, a utilização de 250 ml ha^{-1} de *Bradyrhizobium japonicum* (7x109 UFC ml^{-1}), 200 ml ha^{-1} de *Azospirillum brasilense* (3x108 UFC ml^{-1}) e 120 g ha^{-1} FMA (20.800 propágulos por grama), incrementou o peso de mil grãos (PMG), sendo observado 153g para a testemunha e 180g para este tratamento, representando um ganho de 17,65% (27g). Os demais componentes de rendimento não apresentaram diferenças estatísticas significativas.

No experimento 2, a utilização de 100 ml ha^{-1} de *Bradyrhizobium japonicum* (7x109 UFC ml^{-1}), associada ao aumento no uso de FMA (20.800 propágulos por grama) de 96 para 144 g ha^{-1}, ocasionou incremento no número de vagens por planta e no número de grãos por vagem. Os demais componentes de rendimento não foram influenciados pelos tratamentos.

Os tratamentos estudados, em ambos os experimentos, não influenciaram no NDVI, independente do estádio de desenvolvimento da cultura da soja em que este índice de vegetação foi estimado.

REFERÊNCIAS

BERBARA, R. L. L.; SOUZA, F. A.; FONSECA, H. M. A. C. **Fungos micorrízicos arbusculares, muito além da nutrição**. In: Fernandes, M. S. Nutrição mineral de plantas. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 53–88, 2006.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Safra brasileira de grãos**. julho, 2022. Disponível em: < https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 10 jul. 2022.

DIAS, G. A. O.; ANDRADE G. **Avaliação da eficiência do inoculante de fungo micorrízico arbuscular glomus clarum na produção das culturas de soja (*Glycine max*) e de algodão (*Gossypium hirsutum*) em condições de campo**. In: 8° ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO TECNOLÓGICA E INOVAÇÃO, set. 2018, Londrina. *Anais*. < http://www.eaiti.uem.br/eaiti2018/anais/artigos/142.pdf>. Acesso em: 15 set. 2022.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja – Região Central do Brasil 2011**. - Londrina: Embrapa Soja, 2010. 268 p. (Embrapa Soja. Sistemas de produção, 14). Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/busca-de-publicacoes/-/publicacao/864927/tecnologias-de-producao-de-soja---regiao-central-do-brasil-2011> Acesso em: 20/08/2021.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, Emprapa Informação Tecnológica, 2018, 355p.

ISBN 978-65-990392-6-3

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja.** Londrina: Embrapa Soja, 2007. 10p. (Embrapa soja, circular técnica, 48). Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/busca-de-publicacoes/-/publicacao/470308/ecofisiologia-da-soja > Acesso em: 20/08/2021.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p.1039–1042, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas: O estudo que está por trás do que se vê**. Passo Fundo: Editora da Universidade de Passo Fundo, 2004, 147p.

FLOSS, E. L. **Maximizando o rendimento de soja: Ecofisiologia, nutrição e manejo**. Passo Fundo: Editora Aldeia Sul, 2021, 416p.

MAIS SOJA. **Inoculante inédito, a base de fungo micorrízico, é lançado no Brasil**. 2018. Disponível em: <https://maissoja.com.br/inoculante-com-micorriza-arbascular-inedito-e-lancado-no-brasil/> Acesso em: 15/09/2022.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MATHUR, S.; SHARMA, M. P.; JAJOO, A. Improved photosynthetic efficacy of maize (*Zea mays*) plants with Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under high temperature stress. **Journal of Photochemistry and Photobiology**, v. 180, p. 149–154, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.02.002

MIRANDA, J. C. C.; MIRANDA, L. N. **Micorriza Arbuscular**. In: VARGAS, M. A.; HUNGRIA, M. (Ed). Biologia dos solos dos Cerrados. Brasília: EMBRAPA-CPAC, p. 69–123, 1997.

MIRANDA, J. C. C. de; VILELA, L.; MIRANDA, L. N. de. Dinâmica e contribuição da micorriza arbuscular em sistemas de produção com rotação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 10, p. 1005–1014, 2005. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005001000009

OLIVEIRA, T. C.; UEHARA, H. M.; SILVA, L. D.; TAVARES, G. G.; SANTANA, L. R.; CABRAL, J. S. R.; SOUCHIE, E. L.; MENDES, G. C. Produtividade da soja em associação ao fungo micorrízico arbuscular *Rhizophagus clarus* cultivada em

condições de campo. **Revista de Ciênicas Agroveterinárias**, v. 18, n. 4, p. 530–535, 2019. DOI: https://doi.org/10.5965/223811711832019530

PILAU, F. G.; SANTOS, T. L.; BATTISTI, R.; REICHARDT, K. Why may consider rainfall space-time variability in Precision Agriculture? **Research Square**, 2023. DOI: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2827581/v1

PORTO, A. L.; MIRANDA, C. H. B.; MACEDO, M. C. M. **Distribuição de esporos de fungos micorrízicos em solo dos Cerrados sob diferentes sistemas de produção agropecuária**. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2003. 23p.

QUIÑÓNEZ MARTÍNEZ, M.; ENRÍQUEZ ANCHONDO, I. D.; FLORES MARGEZ, J. P.; PALACIOS RAMÍREZ, K. Y.; OLIVAS SÁNCHEZ, M. P.; GARZA OCAÑAS, F.; LEBGUE KELENG, T.; NÁJERA MEDELLIN, J. A. Comunidades vegetales en suelo de ecosistema semiárido y su relación con hongos micorrízicos. **Terra Latinoamericana**, v. 36, p. 381–391, 2018. DOI: https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.401

SOARES, D. da C. **Efeitos da aplicação de fungos micorrízicos arbusculares (fma) nos componentes de rendimento e resposta espectral da cultura da soja em ano de estresse hídrico**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico, Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão, 2022, 45p.

WILSON, G. W. T.; RICE, C. W.; RILLIG, M. C.; SPRINGER, A.; HARTNETT, D. C. Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments. **Ecology Letters**, v. 12, n. 5, p. 452–461, 2009. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01303.x

CAPÍTULO 6

SIMULAÇÃO DA NECESSIDADE DE IRRIGAÇÃO PARA A CULTURA DA SOJA PARA UM ANO DE EL NIÑO E UM ANO DE LA NIÑA EM CENÁRIOS DE AUMENTO DE TEMPERATURA

Simulation of irrigation needs for soybean crops for an El Niño year and a La Niña year in temperature increase scenarios

Zanandra Boff de Oliveira[1,2]*; Eduardo Leonel Bottega[1,2]; Juliano Arthur Drescher[2]; Bruno Gabriel Mayerhofer[2]; Rafael Röhrs Borges[2]; Beatriz Mariana[2]; Rafaela Fauth Bisol[2]; Alberto Eduardo Knies[3]

[1] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Colégio Politécnico, PPGAP, Av. Roraima 1000 – Camobi, 97105-000, Santa Maria – RS, Brasil, zanandra.oliveira@ufsm.br, eduardo.bottega@ufsm.br.

[2] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), campus de Cachoeira do Sul, Rod. Taufik Germano 3013 – Universitário II, 96503-205, Cachoeira do Sul – Rs, Brasil, zanandra.oliveira@ufsm.br, eduardo.bottega@ufsm.br, julianodrescher3@gmail.com, bruno.mayerhofer@acad.ufsm.br, rafael.rohrs@acad.ufsm.br, beatriz.mariana@acad.ufsm.br, rafaela.bisol0@gmail.com.

[3]Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), R. Sete de Setembro 1040 – Centro, 96508-010, Cachoeira do Sul – RS, Brasil, alberto-knies@uergs.edu.br; *Autor correspondente

RESUMO

Objetivou-se avaliar a necessidade de irrigação da soja para anos de El Niño e La Niña, em cenários de aumento de temperatura do ar (+1,5 e +3ºC), a partir de um software de balanço hídrico e de dados obtidos em experimentos realizado à campo, em Cachoeira do Sul-RS. A modelagem foi realizada a partir de dados observados os anos agrícolas 2023-24 (El Niño) e 2024-25 (La Niña). As simulações foram realizadas pelo modelo CROPWAT-FAO, com dados de cultura, solo e clima (temperatura e chuva), alterando-se apenas os dados de temperatura para o cálculo da evapotranspiração de referência (ETo) e a duração do ciclo (em função da soma térmica). O encurtamento do ciclo da soja (de até 25 dias) fez com que a evapotranspiração da cultura acumulada por etapa e no período total do ciclo fossem menores nos cenários de mudança climática que as atuais, não modificando muito a lâmina de irrigação suplementar necessária. Assim, para o ano de El Niño a necessidade de irrigação de 115 mm poderia chegar a 122 mm (cenário +1,5) e 152 mm (cenário +3ºC) e para ano de La Niña a demanda atual de 199 mm seria modificada para 204 mm (cenário +1,5) e 214 mm (cenário+3ºC).

Palavras-chave: *Glycine Max L.* ENOS. Mudança climática.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the need for soybean irrigation during El Niño and La Niña years, under scenarios of rising air temperatures (+1.5 and +3°C), using water balance software and data obtained from field experiments in Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul. The modeling was based on observed data from the 2023-24 (El Niño) and 2024-25 (La Niña) crop years. Simulations were performed using the CROPWAT-FAO model, using crops, soil, and climate (temperature and rainfall) data. Only the temperature data were modified to calculate the reference evapotranspiration (ETo) and the cycle length (based on thermal sum). Shortening the soybean cycle (up to 25 days) resulted in lower accumulated crop evapotranspiration per

stage and over the entire cycle period under climate change scenarios than current ones, without significantly altering the required supplemental irrigation depth. Thus, for an El Niño year, the irrigation requirement of 115 mm could reach 122 mm (+1.5 scenario) and 152 mm (+3ºC scenario) and for a La Niña year, the current demand of 199 mm would be modified to 204 mm (+1.5 scenario) and 214 mm (+3ºC scenario).

Keywords: *Glycine Max* L. ENOS. Climate change.

1 INTRODUÇÃO

A produtividade da soja (*Glycine max* L.) pode variar em função dos eventos de *El Niño* e *La Niña*, com impactos distintos em cada região. No estado do Rio Grande do Sul em anos de *El Niño*, a soja tende a apresentar produtividades maiores, enquanto anos de La Niña podem resultar em reduções, especialmente devido à influência das chuvas (BERLATO; FONTANA, 2003). Contudo, a distribuição das chuvas durante o ciclo da cultura é a questão chave para boas produtividades. Pois, o déficit hídrico é causado pela distribuição irregular das chuvas e elevada demanda evaporativa da atmosfera (ZIPPER; QIU; KUCHARIK, 2016), que ocorrem principalmente nos meses mais quentes, sobretudo em janeiro, quando a cultura se encontra em fase reprodutiva. Assim, os prejuízos do déficit hídrico sobre o rendimento na cultura da soja dependem da intensidade, duração e época de ocorrência, além da sensibilidade da cultivar, destacando o período reprodutivo como o mais crítico (NEUMAIER et al., 2020).

Nesse contexto, apresentam-se as médias de produtividade da soja no RS nos últimos anos agrícolas, conforme dados da Emater-RS, sendo está de 1.433 kg ha^{-1} na safra 2021/22 (La Niña), de 1.986 kg ha^{-1} na safra 2022/23(La Niña), de 3.329 kg ha^{-1} na safra 2023/24 (El Niño) e de 1.957 kg ha^{-1} na safra 2024/25 (La Niña). Os resultados demonstram a variabilidade da produtividade da cultura associada ao fenômeno El Niño - Oscilação Sul (ENOS). Conforme Kayano; Andreoli (2007), o fenômeno resulta da interação da atmosfera com o oceano, que se caracteriza pelas anomalias na temperatura na superfície do mar no Oceano Pacífico Equatorial (MATZENAUER et al., 2018). Essa mudança na temperatura do oceano Pacífico Equatorial traz efeitos globais na circulação atmosférica, transporte de umidade, precipitação e temperatura (CPTEC, 2023).

A mudança climática pode intensificar o ENOS. O aumento das temperaturas globais, que segundo os cenários devem ser entre 1,5 e 5ºC (IPPC, 2014), causado por gases do efeito estufa, pode levar a eventos de *El Niño* e *La Niña* mais extremos e frequentes, alterando os padrões de chuva e temperatura em todo o mundo (NOAA, 2023). Assim, as mudanças climáticas têm um impacto significativo na produção vegetal, afetando diversos aspectos da agricultura. A redução do ciclo de desenvolvimento dos cultivos, o aumento de pragas e doenças, a elevação da evapotranspiração, que associada a modificação nos padrões das chuvas, contribuem para deficiência hídrica, são alguns dos principais fatores que influenciam negativamente a produtividade das culturas (ASSAD; ASSAD, 2024).

Portanto, a irrigação suplementar desempenha um papel crucial na adaptação às mudanças climáticas e avaliar os impactos dessa mudança na demanda hídrica dos cultivos, é fundamental para a gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos.

Com isso, objetivou-se avaliar a necessidade de irrigação da soja para anos de *El Niño* e *La Niña*, em cenários de aumento de temperatura do ar (+1,5 e +3ºC), a partir de um software de balanço hídrico e de dados obtidos em experimentos realizado à campo, em Cachoeira do Sul-RS.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A modelagem foi realizada a partir de dados observados durante a realização de experimento de campo com a cultura da soja no ano agrícola 2023-24 (*El Niño*) e 2024-25 (*La Niña*). Os experimentos foram instalados na área experimental da UFSM Cachoeira do Sul (longitude de -52,96, latitude de -30,01 e altitude de 79,2 m), em solo classificado como Argissolo Vermelho.

A cultivar BMX Zeus IPRO (GMR 5.5) foi semeada no dia 28/11/2023 e a cultivar Brasmax Titanium TF I2X (GMR 5.6) foi semeada no dia 21/11/2024. Todos os manejos culturais seguiram as recomendações agronômicas para altas produtividades da soja (>4.000 kg ha^{-1}).

A irrigação foi por um sistema de gotejamento superficial instalado na entrelinha de cultivo, com espaçamento entre emissores de 0,20 m. O manejo da irrigação baseou-se no balanço hídrico do solo, conforme Allen et al. (1998), para uma fração de esgotamento de 40 mm da capacidade de água disponível no solo (CAD), sendo a umidade volumétrica na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP) de 0,284 e 0,150 $cm^3\ cm^{-3}$, respectivamente, para a camada de 0 a 40 cm de profundidade do perfil do solo. Durante o ciclo de desenvolvimento da soja foram realizadas avaliações fenológicas e a determinação da profundidade máxima de exploração do sistema radicular que foi de 40 cm de profundidade, determinada por meio de trincheira quando a cultura estava em estádio de R2 (plena floração).

Os dados meteorológicos e a evapotranspiração de referência (ETo) foram obtidos de uma estação automática (Metos-Brasil) instalada a cerca de 50 m do local do experimento. A evapotranspiração da cultura (ETc: ETo x Kc), foi obtida pela multiplicação da ETo pelo coeficiente de cultura (Kc). O cálculo do Kc levou em consideração a fração de cobertura do dossel (Fc), que indica o ponto de inflexão e deflexão na curva do Kc (ALLEN et al., 1998).

O cálculo da soma térmica diária (ST d.) foi realizado com a temperatura média do ar diária (ºC) subtraída da temperatura basal inferior da cultura (10ºC) e partir do somatório desta, calculou-se a soma térmica acumulada (ST ac.) em graus dias acumulados (graus-dia-acumulados, GDA em ºC), para cada período do ciclo da cultura que representou a inflexão do Kc.

A Tabela 1 apresenta o percentual de fechamento do dossel, as datas de ocorrência e o valor as ST ac, utilizados para o ajuste da curva de Kc. Na Tabela 2, é possível observar as datas após a aplicação dos cenários de mudança climática (+1,5ºC e +3ºC) para o cálculo da soma térmica, utilizados para a simulação no software CROPWAT.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 1 – Etapas do ciclo da cultura da soja utilizada para a definição da evolução da curva do Kc, datas de ocorrência e soma térmica acumulada (ST ac.) para o período.

Etapa do ciclo	Ciclo 2023-24		Ciclo 2024-25	
	Data	ST ac.	Data	ST ac.
Semeadura	28/11/2023		21/11/2024	
10% do fechamento da entrelinha de cultivo	13/12/2023	211,1	11/12/2024	268,6
100% do fechamento da entrelinha de cultivo	07/01/2024	610,0	11/01/2025	701,4
Início da senescência	21/03/2024	1.724,4	07/03/2025	1.692,3
Colheita	18/04/2024	2.072,6	05/04/2025	2.083,4

Fonte: Autores, 2025.

O software, desenvolvido pela FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura), é uma ferramenta utilizada para auxiliar no planejamento e manejo da irrigação em culturas agrícolas. Ele permite calcular ETo, ETc, as necessidades hídricas das culturas (lâmina, mm) e gerar programas de irrigação, além de avaliar a performance das culturas sob diferentes condições de irrigação e sequeiro. Sendo assim, foi possível calcular para os cenários propostos os novos valores de ETo, a nova duração do ciclo, a parir das etapas do Kc e, assim, os novos valores de ETc.

Foram utilizados os seguintes parâmetros de entrada no CROPWAT:

1. Clima – temperatura mínima e máxima, ajustadas para os dois cenários (+1,5 e +3ºC), utilizadas no cálculo da ETo método de FAO - PM (ALLEN et al., 1998), com os demais parâmetros estimados pelo software. Os dados de precipitação foram obtidos diretamente no local do experimento;
2. Cultura – profundidade mínima e máxima do sistema radicular, fixada em 10 e 40 cm, respectivamente, altura máxima da cultura de 100 cm; duração dos subperíodos de desenvolvimento da cultura conforme Tabelas 1 e 2;
3. Solo – total de água disponível entre a CC e o PMP de 134 mm/m; máxima profundidade do sistema radicular de 40 cm (determinada em R2); e depleção inicial de 15 (2023-24) e 19 mm (2024-25) – determinada com base na umidade volumétrica da camada de 0 a 10 cm no dia da semeadura;
4. Programação da irrigação - depleção crítica fixada 40 mm para reabastecer o conteúdo de umidade do solo em 60% da capacidade de campo, mantendo o manejo adotado em campo durante os experimentos.

Tabela 2 – Etapas do ciclo da cultura da soja utilizada para a definição da evolução da curva do Kc, datas de ocorrência e soma térmica acumulada (ST ac.) para o período, após a aplicação dos cenários com o aumento da temperatura.

Etapa do ciclo	Ciclo 2023-24		Ciclo 2024-25	
	Cenário 1 (+1,5ºC) Data	Cenário 2 (+3ºC) Data	Cenário 1 (+1,5ºC) Data	Cenário 2 (+3ºC) Data
Semeadura	28/11/2023	28/11/2023	21/11/2024	21/11/2024
10% do fechamento da entrelinha de cultivo	11/12/2023	10/12/2023	07/12/2024	06/12/2024
100% do fechamento da entrelinha de cultivo	04/01/2024	01/01/2024	05/01/2025	02/01/2025
Início da senescência	11/03/2024	04/03/2024	27/02/2025	21/02/2025
Colheita	03/04/2024	24/03/2024	23/03/2025	11/03/2025

Fonte: Autores, 2025.

Foram realizadas três simulações para cada ano agrícola: (i) condições observadas a campo; (ii) cenário 1, com acréscimo de +1,5ºC nas temperaturas máximas e mínimas para o cálculo da ETo e ajuste da duração das fases do ciclo (Tabela 2), mantendo os valores de chuvas observados; (iii) cenário 2, com acréscimo de +3,0ºC nas temperaturas, seguindo os mesmos procedimentos do cenário anterior. Os parâmetros avaliados formam os seguintes: ETc por etapa e acumulada no ciclo, chuva efetiva por etapa e acumulada no ciclo (mm) e lâmina de irrigação necessária por etapa e acumulada no ciclo (mm).

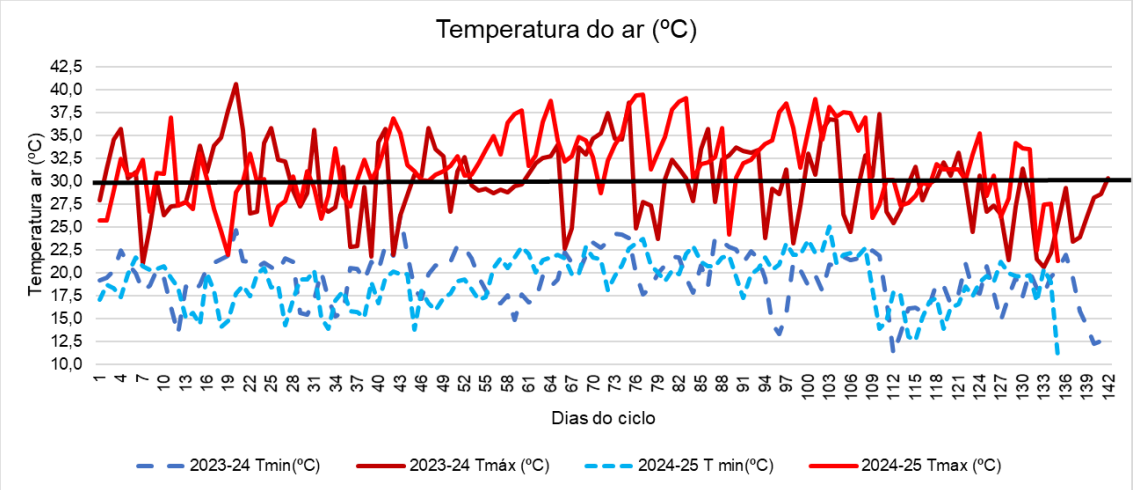
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de temperatura observados (Figura 1), demonstram que a temperatura máxima do ar (T máx) foi bastante elevada em ambos os anos. A amplitude térmica foi de 11,0 a 40,5ºC em 2023-24 e de 10,7 a 39,5ºC em 2024-25. Contudo, em 2024-25 a T máx foi superior a 30ºC em 72% do período de duração do ciclo de cultivo, que foi de 135 dias. Enquanto, em 2023-24, essa foi superior aos 30ºC em 51% do ciclo de cultivo, que foi de 142 dias. A temperatura ideal para o desenvolvimento da soja está em torno de 30°C (NEUMAIER et al., 2020), tendo o crescimento vegetativo pequeno ou nulo a temperaturas menores ou iguais a 10ºC (SCHNEIDER et al.,1987). A soma térmica acumulada da semeadura a colheita foi bem similar para as duas cultivares avaliadas (Tabela 1) de 2.072,6 GDA para cultivar BMX Zeus e de 2.083,4 GDA para a cultivar BMX Titanium, portanto a duração em dias do ciclo é atribuída as diferenças de temperatura de cada ano agrícola. Temperaturas mais altas, aceleram a evaporação da água do solo e a transpiração das plantas, aumentando a taxa de evapotranspiração, além de alterar a soma térmica necessária para o desenvolvimento de uma cultura, levando a reduções no ciclo de cultivo (RENATO et. al, 2013).

Desse modo, a aplicação dos cenários de aumento de temperatura influenciou no aumento da soma térmica diária e impactou na redução do ciclo de desenvolvimento da cultura (Tabela 2), em 15 dias (cenário 1) e 25 dias (cenário 2) para o ano agrícola 2023-24 e em 12 dias (cenário 1) e 23 dias (cenário 2) para o ano agrícola 2024-25. Sobretudo, a redução é no período médio (100% do fechamento da entrelinha até início da senescência), que compreende a fase reprodutiva da cultura, quando a temperatura do ar é maior (Figuras 1 e 2).

A fase reprodutiva mais curta na soja, especialmente se ocorrer durante o enchimento de grãos, pode levar à redução do tamanho e da qualidade dos grãos. Assim, o manejo adequado da lavoura e a escolha de cultivares adequadas são importantes para minimizar esses impactos. Conforme Streck; Alberto (2006), o aumento na temperatura do ar de 3, 6 e 2ºC pode anular os efeitos benéficos do aumento de CO_2 no rendimento das culturas de trigo, soja e milho, respectivamente. Visto que, o aumento da concentração de CO_2 atmosférico, substrato primário para fotossíntese, pode aumentar a taxa de crescimento (TAIZ; ZEIGER, 2013), sobretudo, de plantas com metabolismo fotossintético C_3, como é o caso da soja (TUBIELLO et al., 2000; STRECK et al., 2005).

Figura 1 – Valores de temperatura do ar observados durante o ciclo de desenvolvimento da soja nos anos agrícolas 2023-24 e 2024-25.



Fonte: Autores, 2025.

O aumento da temperatura (cenários 1 e 2) influenciou na elevação da ETc diária (Figura 2), o que já era esperado, conforme Oliveira (2015) a variável meteorológica com maior associação com a ETo é a temperatura máxima do ar. Entretanto, em função do encurtamento do ciclo, a ETc acumulada por etapa e no período total (Tabela 3), foi menor que nas condições atuais para os dois cenários no ano agrícola 2023-24 e no cenário 1 para o ano agrícola 2024-25 (Tabela 3).

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 3 – Valores de evapotranspiração da cultura (ETc), chuva, chuva efetiva e lâmina de irrigação por etapas e acumuladas no ciclo de desenvolvimento da soja, nas condições atuais e em dois cenários de aumento de temperatura (+1,5 e +3ºC), para dois anos agrícola 2023-24 (El Niño) e 2024-25 (La Niña).

Ano agrícola 2023-24 (El Niño) Condições de campo					**Ano agrícola 2024-25 (La Niña) Condições de campo**				
	ETc	**Chuva**	**Chuva ef.**	**Irri.**		**ETc**	**Chuva**	**Chuva ef.**	**Irri.**
Etapa	**(mm)**				**Etapa**	**(mm)**			
Inicial	11,2	44,4	37,0	0,0	Inicial	9,9	67,2	49,7	0,0
Desen.	67,8	160,4	99,2	0,0	Desen.	71,1	53,6	45,2	25,3
Médio	310,2	316,2	200,8	115,0	Médio	267,1	172,6	103,7	149,1
Final	52,2	165,6	117,4	0,0	Final	57,4	60,2	71,4	24,6
Soma	**441,4**	**686,6**	**454,4**	**115,0**	**Soma**	**405,5**	**353,6**	**270,0**	**199,0**
Cenário 1 (+1,5ºC)					**Cenário 1 (+1,5ºC)**				
	ETc	**Chuva**	**Chuva ef.**	**Irri.**		**ETc**	**Chuva**	**Chuva ef.**	**Irri.**
Etapa	**(mm)**				**Etapa**	**(mm)**			
Inicial	9,9	42,0	38,7	0,0	Inicial	8,4	7,4	7,1	0,0
Desen.	70,5	162,8	99,2	0,0	Desen.	74,3	113,4	77,2	25,6
Médio	289,3	224,4	150,0	122,0	Médio	251,7	126,0	111,1	154,9
Final	54,0	134,0	90,9	0,0	Final	64,6	69,2	54,6	24,1
Soma	**423,7**	**563,2**	**378,8**	**122,0**	**Soma**	**399,0**	**316,0**	**250,0**	**204,6**
Cenário 2 (+3ºC)					**Cenário 2 (+3ºC)**				
	ETc	**Chuva**	**Chuva ef.**	**Irri.**		**ETc**	**Chuva**	**Chuva ef.**	**Irri.**
Etapa	**(mm)**				**Etapa**	**(mm)**			
Inicial	9,5	42,0	5,2	0,0	Inicial	12,4	7,4	7,1	0,0
Desen.	71,9	162,8	132,7	0,0	Desen.	77,8	113,4	77,2	30,8
Médio	273,4	194,6	124,5	152,2	Médio	260,9	134,4	111,1	153,0
Final	54,6	121,6	85,8	0,0	Final	54,8	72,0	49,3	30,7
Soma	**409,4**	**521,0**	**348,2**	**152,2**	**Soma**	**405,9**	**327,2**	**244,7**	**214,5**

Fonte: Autores, 2025.

Além da modificação na ETc, houve modificações no aproveitamento das chuvas ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura (Figura 2 e Tabela 3). Observa-se que a aceleração do desenvolvimento da soja nos cenários futuros possibilitou um melhor aproveitamento das chuvas de dezembro durante a fase vegetativa.

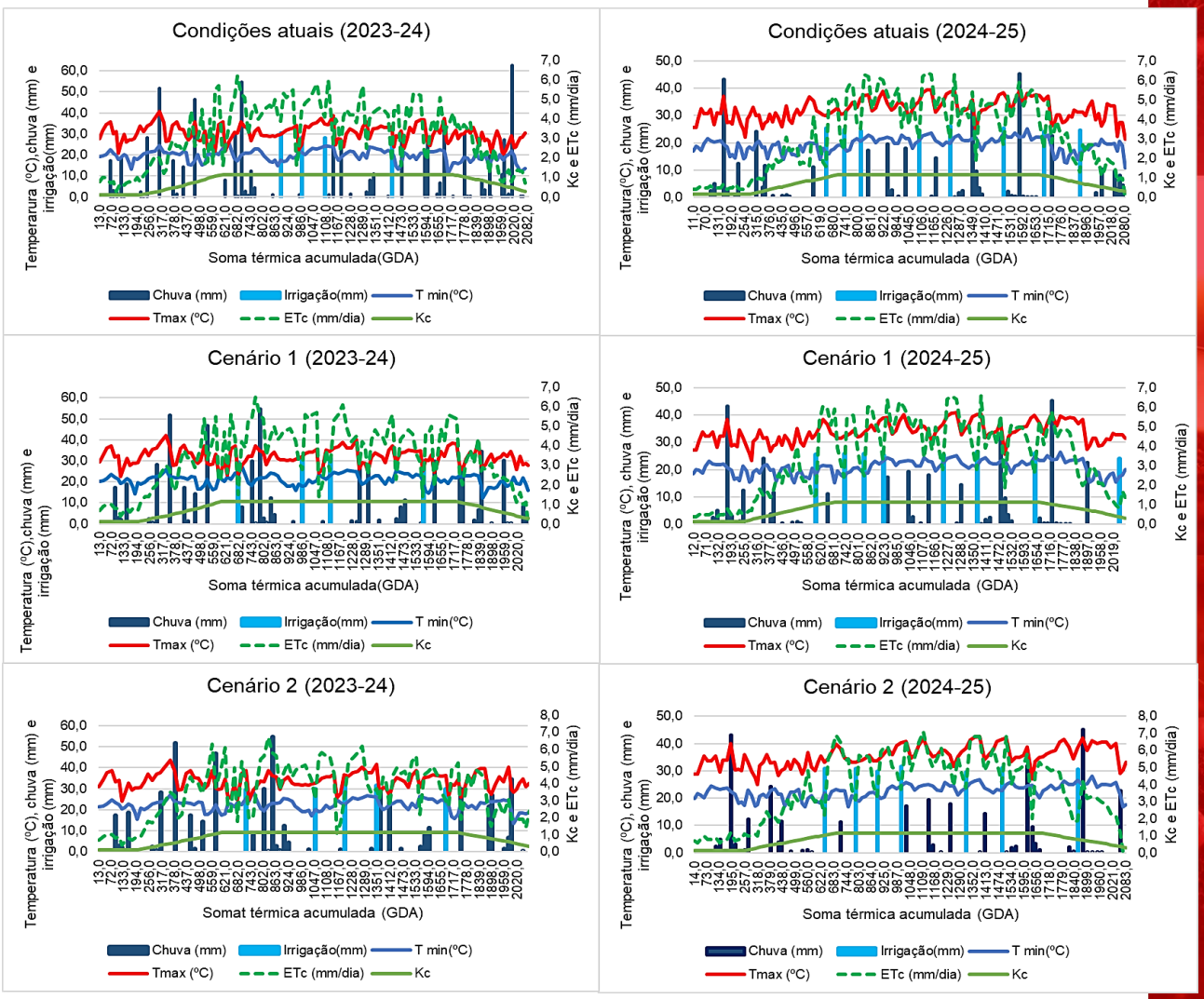
Por outro lado, o déficit hídrico que ocorreu na fase reprodutiva para os dois anos agrícolas é agravado nos cenários de aumento da temperatura (Figura 2 e Tabela 3). O déficit hídrico é o fator principal na perda de produtividade da soja (SILVA et al., 2020), principalmente na fase reprodutiva, em função do abortamento das flores e vagens, além de diminuir o tamanho e o peso dos grãos (KUSS, 2006).

Portanto, a condição da deficiência hídrica, que acontece principalmente em função da distribuição irregular das chuvas no ciclo, faz com que tanto no ano de *El*

ISBN 978-65-990392-6-3

Niño (acumulado de chuvas de 686, 3 mm), quanto no ano de *La Niña* (acumulado de chuvas de 353, 6 mm), sejam necessárias irrigações suplementares, com ênfase na fase reprodutiva da cultura (entre 600 e 1700 GDA).

Figura 2- Parâmetros de balanço hídrico simulados pelo modelo CROPWAT- FAO para as condições atuais (observadas a campo) e em dois cenários de aumento de temperatura (+1,5 e +3ºC), para dois anos agrícola 2023-24 (*El Niño*) e 2024-25 (*La Niña*).



Fonte: Autores, 2025.

Para condição de *El Niño* a necessidade de irrigação suplementar que foi de 115 mm nas condições atuais pode chegar a 152 mm no cenário mais pessimista, ou seja 32% a mais, sendo toda a lâmina de irrigação necessária na fase reprodutiva da cultura. Já, para as condições de *La Niña*, os menores acumulados de chuva agravam ainda mais a situação da deficiência hídrica. Nessa situação, a lâmina de irrigação suplementar acumulada no ciclo para as condições atuais foi de 199 mm, distribuída em todas as etapas do ciclo, com exceção a inicial, mas com maior frequência e acumulados na fase reprodutiva. Assim, mesmo com um melhor aproveitamento das chuvas efetivas, que acontece nos cenários 1 e 2, a demanda por irrigação

suplementar, passa a ser ainda maior, com um incremento de 3 e 7% nos cenários 1 e 2, respectivamente.

Portanto, nas condições simuladas a lâmina de irrigação acumulada no ciclo da soja pode chegar a 122 e 152 mm (*El Niño*) e a 204 e 214 mm (*La Niña*), para os cenários 1 e 2, respectivamente. Ressalta-se que essas simulações consideram apenas o aumento de temperatura, sem alterações nos volumes ou na distribuição das chuvas, um aspecto que deve ser mais bem explorado em estudos futuros. Assmann e Oliveira (2023), observaram que, ao longo de 20 anos agrícolas (2001 a 2022) em Cachoeira do Sul–RS, a necessidade de irrigação para a cultura da soja varia entre 75 e 345 mm, ou seja, a distribuição e o acumulado de chuvas modificam bastante a demanda por irrigação suplementar. O padrão das chuvas já vem se alterando, pois segundo Oliveira (2024) em Cachoeira do Sul, região central do RS, houve o acréscimo de 11% nas chuvas no período de 1989-2024 em comparação a 1961-1990, com maior incremento nos meses de outono e primavera, ainda assim, predomina chuva abaixo da média na maioria dos anos e dos meses, sobretudo, dezembro e janeiro. Demonstrando a intensificação de eventos extremos (excesso e déficit hídrico) na região.

4 CONCLUSÃO

A irrigação suplementar, necessária para a cultura da soja na região de estudo, independe da condição do ENOS (*La Niña* ou *El Niño*), deve ser vista como uma estratégia de manejo fundamental para adaptação às mudanças climáticas.

A necessidade de irrigação suplementar para o ano de *El Niño* de 115 mm poderia chegar a 122 mm (cenário 1) e 152 mm (cenário 2) e para ano de *La Niña* a demanda atual de 199 mm seria modificada para 204 mm (cenário 1) e 214 mm (cenário 2).

Nas condições simuladas o encurtamento do ciclo de desenvolvimento compensou o aumento da evapotranspiração diária da cultura, modificou o aproveitamento das chuvas efetivas e não gerou grandes alterações na lâmina de irrigação suplementar necessária.

Estudos considerando as modificações no padrão das chuvas devem ser realizados para melhorar a compreensão do impacto da mudança climática como um todo na modificação da necessidade de irrigação suplementar para a cultura da soja na região.

Estudos que avaliem a resposta da cultivar (duração e ciclo) e da data de semeadura, também, são fundamentais para maximizar a produtividade da cultura da soja, buscando mitigar os impactos do aumento da temperatura na redução do ciclo de desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

ASSAD, E.D.; ASSAD, M.L.R.C. Mudanças do clima e agropecuária: impactos, mitigação e adaptação. Desafios e oportunidades. **Estudos avançados**, v. 38, n.112 •Sep-Dec 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438112.015. Acesso em 19 ago. 2025.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ASSMAN, J. OLIVEIRA, Z, B. Simulação do balanço hídrico sequencial e da necessidade de irrigação para a cultura da soja em vinte anos agrícolas. **Irriga**, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 164–175, 2023. DOI: 10.15809/irriga.2023v28n1p164-175.

BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. **El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2003. 110p.

CPTEC. **Centro de Previsões de Tempo e Estudos Climáticos**. Disponível em < http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em 25 nov. 2024.

IPCC. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change.** Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.

KUSS, R. C. R. Populações de plantas e estratégias de irrigação na cultura da soja. **Dissertação (**Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria – Área de Concentração em Engenharia de Água e solo. Santa Maria – RS, 2006.

MATZENAUER, R.; RADIN, B.; FILHO, C. A. Rendimento de grãos de soja e de milho, no Rio Grande do Sul, não difere entre eventos El Niño Oscilação Sul. **Revista Agrometeoros,** v.26, n.1, p.123-129, 2018.

NEUMAIER, N.; et al. **Ecofisiologia da soja**. CP2. Disponível em < https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/219401/1/p.-33-54-de-SP-17-2020 online.pdf >. Acesso em 25 nov.2023.

NOOA- **National Weather Service. Climate Prediction Center**. Disponível em < https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php>. Acesso em 25 jun.2025.

OLIVEIRA, Z.B. Climatologia de Chuvas para Cachoeira do Sul – RS. **Irriga**, [S. l.], v. 29, p. 14–24, 2024. DOI: 10.15809/irriga.2024v29p14-24. Disponível em:

ISBN 978-65-990392-6-3

https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4877. Acesso em: 26 jun. 2025.

OLIVEIRA, Z.B. Estimated Evapotranspiration Forecast Of Daily Data From Weather. 2015. 95 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

RENATO, N. S.; SILVA, J. B. L.; SEDIYAMA, G. C.; PEREIRA, E. G. Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão. **Revista brasileira meteorologia,** São Paulo, v. 28, n. 4, p. 382-388, Dec. 2013

SCHNEIDER, F.M.; ZAGO, V. Estimativa do plastocrono em meloeiro (Cucumis melo L.) cultivado em estufa plástica em diferentes épocas do ano. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.6, p.1275-1280, 2005.

SILVA, L.P.; BATTISTI, R.; KNAPP, F. M.; SANTOS, T. G.; ALVES JUNIOR, J. Estimativa da produtividade de soja usando irrigação na época das chuvas no bioma Cerrado. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.28, e.026702, 2020.

STRECK, N.A.; TIBOLA, T.; LAGO, I.; BURIOL, G.A.; HELDWEIN, A.B.; SCHNEIDER, F.M.; ZAGO, V. Estimativa do plastocrono em meloeiro (Cucumis melo L.) cultivado em estufa plástica em diferentes épocas do ano. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.6, p.1275-1280, 2005.

STRECK, N. A., & ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 41(9), 1351–1359,2006. https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2006.v41.7289

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal.** 5.ed. Porto Alegre: Artemed, p. 954, 2013.

TUBIELLO, F.N. et al. Effects of climate change and elevated CO_2 on cropping systems: model predictions at two Italian locations. **European Journal of Agronomy**, v.13, p.179-189, 2000.

ZIPPER, S. C.; QIU, J.; KUCHARIK, C. J. Drought effects on US maize and soybean production: spatiotemporal patterns and historical changes. **Environmental Research Letters**, United Kingdom, v. 11, n.9, p.1-12,2016.

CAPÍTULO 7

VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE RELATIVA DA SOJA ESTIMADA EM TRÊS SAFRAS DE LA NIÑA NO RIO GRANDE DO SUL

Spatial variability of relative soybean productivity estimated in three La niña crops in Rio Grande do Sul

Bruna Rathke[1a], Zanandra Boff de Oliveira[2,3]*; Eduardo Leonel Bottega[2,3], Reyel Kiefer Unfer [3], Pedro Eduardo Fischer Boeno [3], Ana Luíza Canto da Silva [3], José Alexandre Bredow[2]

[1] Eng. Agrônoma, Mestre em Agricultura de Precisão (PPGAP/UFSM), agronomabrunarathke@gmail.com
[2] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Colégio Politécnico, Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão (PPGAP), Av. Roraima 1000 – Camobi, 97105-000, Santa Maria – RS, Brasil, zanandra.oliveira@ufsm.br, eduardo.bottega@ufsm.br, josebredow@hotmail.com.
[3] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), campus de Cachoeira do Sul, Rod. Taufik Germano 3013 – Universitário II, 96503-205, Cachoeira do Sul – RS, Brasil, zanandra.oliveira@ufsm.br, eduardo.bottega@ufsm.br, reyelg2@gmail.com, pedroeduardo445@gmail.com, ana.canto@acad.ufsm.br
[a] Parte da dissertação de mestrado em Agricultura de Precisão (PPGAP/UFSM); *Autor correspondente

RESUMO

Objetivou-se estimar a produtividade relativa (%) da soja em 47 municípios do RS, para as datas de emergência de 2/11, 2/12 e 2/1, para os três anos de La Niña 2020/21, 2021/22 e 2022/23, em solos com capacidade de água disponível (CAD) de 40 e 51,2 mm e ciclo da soja de 120 e 130 dias. Ainda, realizar mapas de variabilidade espacial da produtividade relativa (%) e das chuvas acumuladas (mm), com os valores médios para os três anos agrícolas. A estimativa da produtividade relativa foi realizada pelo aplicativo Sisdagro INMET. Os mapas foram elaborados através da interpolação IDW e foi utilizado o software GS+. A produtividade relativa média estimada para todas as condições de simulação foi de 51%. A produtividade relativa estimada apresentou padrão de variabilidade espacial diferente entre as datas de semeadura, valores de CAD e duração de ciclo e manteve padrão espacial similar ao das chuvas acumuladas (mm). A região oeste do estado, onde choveu menos, apresentou as produtividades mais baixas e intermediárias (>25<45%) e nas regiões de maior altitude, onde choveu mais, as produtividades foram mais elevadas, chegando em até 86%, na semeadura mais tardia. Ciclos de desenvolvimento mais longos e semeaduras mais tardias podem contribuir para o aumento da produtividade relativa da soja.

Palavras-chave: *Glycine Max L.* ENOS. Déficit hídrico.

ABSTRACT

The objective of this study was to estimate the relative productivity (%) of soybeans in 47 municipalities of RS, for the emergency dates of 2/11, 2/12 and 2/1, for the three La Niña years 2020/21, 2021/22 and 2022/23, in soils with available water capacity (AWC) of 40 and 51.2 mm and a soybean cycle of 120 and 130 days. Furthermore, to produce maps of spatial variability of relative productivity (%) and accumulated rainfall (mm), with the average values for the three agricultural years. The estimate of relative productivity was performed using the Sisdagro

INMET application. The maps were prepared through IDW interpolation and the GS+ software was used. The estimated average relative productivity for all simulation conditions was 51%. The estimated relative productivity showed a different spatial variability pattern between sowing dates, CAD values and cycle length and maintained a spatial pattern similar to that of accumulated rainfall (mm). The western region of the state, where it rained less, presented the lowest and intermediate productivity (>25<45%) and in the regions of higher altitude, where it rained more, productivity was higher, reaching up to 86%, in the later sowing. Longer development cycles and later sowing can contribute to increased relative soybean productivity.
Keywords: *Glycine Max* L. ENOS. Water deficit.

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.), é uma cultura importante para a agricultura brasileira, mas sua produtividade é afetada em função da irregularidade e quantidade de chuvas (REDIN, 2017). Segundo a CONAB (2023), a área plantada de soja no Brasil na safra 2020/21 foi de 39.531 mil hectares, seguindo com 41.492 mil hectares na safra 2021/22 e com 44.080 mil hectares na safra 2022/23. No estado do Rio Grande do Sul, foram 6.055 mil hectares implantados com a cultura na safra 2020/21, com produtividade média de 3.433 kg ha^{-1}. Na safra 2021/22 foram utilizados 6.358 mil hectares, com produtividade de 1.433 kg ha^{-1} e na safra 2022/23 foram 6.055 mil hectares semeados com a cultura e a produtividade foi de 1.986 kg ha^{-1}. Os resultados da produtividade média da cultura no RS demonstram a variabilidade anual da produtividade, que pode ser associada à variabilidade das chuvas para cada ano agrícola.

Conforme Kayano; Andreoli (2007) uma das causas mais importantes de variabilidade climática é o fenômeno El Niño- Oscilação Sul (ENOS). Ele resulta da interação da atmosfera com o oceano, que se caracteriza pelas anomalias na temperatura na superfície do mar no Oceano Pacífico Equatorial (MATZENAUER et al., 2018). Essa mudança na temperatura do oceano Pacífico Equatorial traz efeitos globais na circulação atmosférica, transporte de umidade, precipitação e temperatura (CPTEC, 2023), sendo que, o El Niño se caracteriza pelo aquecimento anormal das águas do Oceano Pacífico Equatorial, e a La Niña representa o esfriamento das águas do oceano (SANTOS; FILHO; BRITO, 2010). No Rio Grande do Sul, em anos sob a influência de El Niño, as chuvas tendem a ser acima da média e em anos sob a influência da La Niña, as chuvas tendem a ser abaixo da média climatológica.

No Rio Grande do Sul, o déficit hídrico pode ocorrer em todos os anos agrícolas durante o ciclo de desenvolvimento da soja. Conforme Assmann; Oliveira (2023), que simularam o balanço hídrico sequencial e da necessidade de irrigação para a cultura da soja em 20 anos agrícolas (2001 a 2022) em Cachoeira do Sul –RS, a irrigação suplementar foi necessária em todos os anos agrícolas, com lâminas acumuladas variando entre 75 e 345 mm. O déficit hídrico é causado pela distribuição irregular das chuvas e elevada demanda evaporativa da atmosfera (ZIPPER; QIU; KUCHARIK, 2016), com maior agravamento em anos de La Niña (BERLATO e FONTANA, 2003).

Os prejuízos do déficit hídrico sobre o rendimento na cultura da soja dependem da intensidade, duração e época de ocorrência, além da sensibilidade da cultivar, destacando o período reprodutivo como o mais crítico (NEUMAIER et al., 2020). Neste contexto, muitos prejuízos econômicos foram registrados entre janeiro de 2019 e

novembro de 2021, no equivalente de indenizações de R$9,5 bilhões (MAPA, 2023). Na safra 2020/2021 houve mais de 81 mil acionamentos de Seguro Rural e Proagro devido à seca nos estados do PR, RS, MS, SC e SP para soja e milho (MAPA, 2023). Confirmando que o clima é o principal fator responsável pelas oscilações de produtividade e frustrações da cultura da soja no estado (MATZENAUER et al., 2018) o que impacta na economia como um todo.

Além disso, técnicas geostatísticas estão sendo cada vez mais utilizadas para compreender a variabilidade espacial das mais diversas variáveis dentro da produção agropecuária, contribuindo para a definição de locais com características similares, favorecendo assim, uma melhor gestão dos recursos. Mapas que representam essa variabilidade permitem uma análise mais precisa de como as chuvas e outras variáveis (como atributos do solo, temperatura, entre outros) se distribuem no espaço, auxiliando em tomadas de decisão mais eficientes (SANTOS et al., 2011; LIMA et al., 2015). Dessa forma, objetivou-se estimar a produtividade relativa (%) da soja e gerar mapas da espacialização dessa variável no RS, para três datas de emergência, em três safras de La Niña, para diferentes valores de CAD do solo e duração do ciclo da soja.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A estimativa da produtividade relativa da soja (%) foi pelo modelo disponível no Sisdagro: http://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/monitoramento/bhc, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2024). O mesmo possui informações meteorológicas registradas em uma rede de estações vinculadas ao INMET e de dados obtidos por modelos de previsão numérica do tempo. A estimativa da produtividade no aplicativo é feita por meio de modelos matemáticos que visam simular e estabelecer relações entre as condições de crescimento das culturas e suas produtividades, baseados em processos físicos e fisiológicos. O INMET utiliza o modelo de penalização por déficit hídrico, sendo a penalização final calculada conforme o proposto por Doorenbos; Kassam (1994) e acumulada em passo de tempo decendial. Esse modelo é função da evapotranspiração potencial da cultura (ETPc), da evapotranspiração real da cultura (ETRc) e do coeficiente de penalização por déficit hídrico (Ky), conforme a Equação 1:

$$Yd = \left(1 - \frac{ETRc}{ETPc}\right) * Ky * 100 \quad (1)$$

Onde: Yd = penalização diária em porcentagem (%).

As estimativas de produtividade foram realizadas para os anos agrícolas 2020/2021; 2021/2022 e 2022/2023, para os 47 municípios do estado do RS que possuem estação meteorológica vinculadas ao INMET. Esses três anos agrícolas foram caracterizados pela ocorrência da fase negativa do fenômeno ENOS (La Niña), sendo 2020/2021 e 2021/2022 considerados como eventos de intensidade moderada e 2022/2023 como de intensidade fraca (NOAA, 2025). No estado, solos com diferentes texturas são encontrados, incluindo arenosos, argilosos e médios, contudo, para esse estudo optou-se por trabalhar com solos médios e argilosos. Assim, os dados de entrada no aplicativo foram os seguintes: (i) datas de emergência da soja: 02/11, 02/12 e 02/1, definidas a partir do zoneamento agrícola de risco climático

(ZARC); (ii) duração do ciclo de 120 e de 130 dias; (iii) valores de CAD do solo: 40 mm (solo médio) e 51,2 mm (solo argiloso); (iv) estação meteorológica (local).

Ao todo foram realizadas 564 simulações, sendo os resultados gerados pelo aplicativo, tabulados e posteriormente convertidos em valores médios para os três anos agrícolas para cada situação simulada. A partir do banco de dados, foram realizadas as análises geoestatatísticas e os mapas de variabilidade espacial para cada situação (solo x ciclo x data de semeadura). A dependência espacial das variáveis (produtividade relativa final e chuvas acumuladas) no território gaúcho foram avaliadas pelos ajustes de semivariogramas, pressupondo a estacionaridade da hipótese intrínseca.

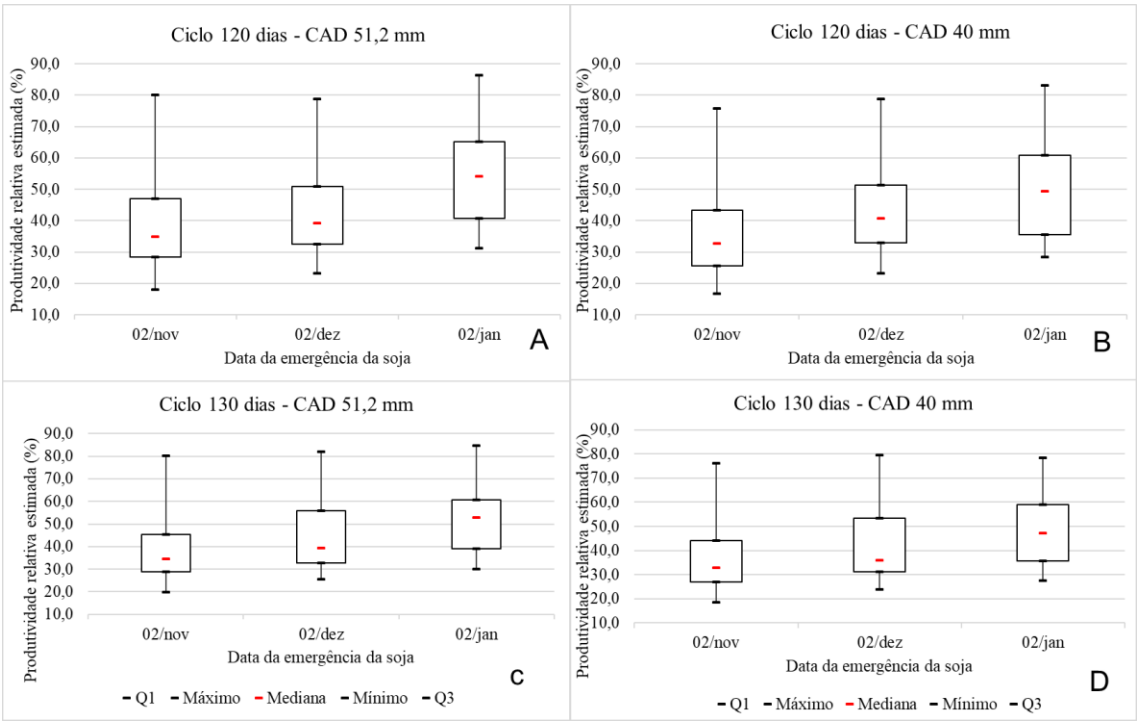
Inicialmente, realizou-se o ajuste do modelo teórico de semivariância e posteriormente a análise da validação cruzada, a fim de quantificar o erro de predição do modelo. Selecionou-se o modelo que, após este processo apresentou a menor soma dos quadrados do resíduo (SQR) e fez-se a análise dos seguintes parâmetros dos semivariogramas: efeito pepita (C0), patamar (C0 + C) e alcance (A) e da validação cruzada: coeficiente de regressão (CR), intercepto (Y), erro padrão (SE), erro padrão de predição (EPP) e coeficiente de determinação (R^2). A interpolação dos mapas foi realizada através da Ponderação pelo Inverso da Distância (Inverse Distance Weighting), que é utilizada para estimar valores de locais onde não há dados disponíveis. Entende-se que os locais mais próximos são mais semelhantes entre si e quanto maior for a distância de um ponto a ser interpolado, menor será seu peso (LU; WONG, 2008).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados médios estimados de produtividade relativa final (%) são crescentes à medida que ocorre o atraso na semeadura de final de outubro para final de dezembro, para todas as combinações de simulação (Figura 1).A dispersão dos dados (intervalo interquartílico) é menor para as datas de semeadura no mês outubro, indicando uma menor variabilidade da produtividade da soja para a semeadura nesse período. Porém, uma menor diferença entre valores mínimos e máximos e valores médios mais elevados, acontece para as datas de emergência de 02/dezembro e 02/janeiro, indicando a possibilidade da obtenção de maior produtividade com o atraso da semeadura em uma maior quantidade de locais. De um modo geral, ocorre uma diferença maior entre a mediana e os valores máximos, bem como, uma maior diferença interquartis da mediana para a o terceiro quartil, demonstrando que produtividade estimada é maior que a média em um maior número de locais simulados.

Maiores produtividades relativas estimadas para semeaduras mais tardias, para maior parte dos locais (Figuras 1 e 2), podem estar relacionados a melhor distribuição e quantidade de chuvas durante o ciclo da cultura da soja. Segundo Matzenauer et al. (2018), que avaliaram a quantidade e a distribuição da precipitação pluvial anual, estacional e mensal em 28 localidades do RS em relação ao fenômeno ENOS, em eventos La Niña chove menos na primavera, mas as chuvas são em maior quantidade que em anos neutros em janeiro e chove mais em março.

Figura 1 – Boxplot da produtividade relativa (%) final da soja estimada para 47 locais do Rio Grande do Sul para solos com CAD 51,2 mm e ciclo 120 dias (A), solos com CAD 40,0 mm e ciclo 120 dias (B), solos com CAD 51,2 mm e ciclo 130 dias (C) e solos com CAD 40,0 mm e ciclo 130 dias (D).



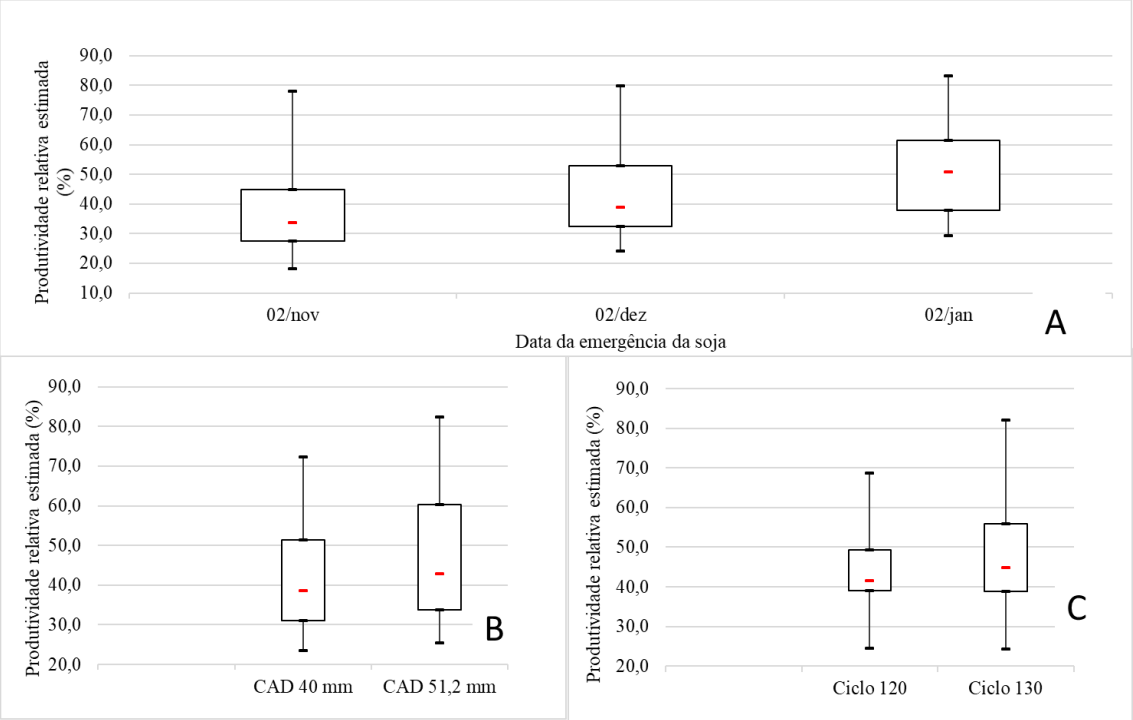
Fonte: Autores (2025).

Na soja, o período reprodutivo é o mais sensível ao déficit hídrico (OLIVEIRA et al., 2023). Assim, para as semeaduras mais tardias, em meados e final de dezembro, no período reprodutivo (floração e enchimento de grãos), as chuvas tendem a ser em maior quantidade e voltar a regularidade, potencializando a produtividade da cultura.

Produtividades superiores em solos com CAD 51,2 mm (Figura 2), eram esperadas em função do maior armazenamento de água no solo contribuir para que as plantas fiquem mais tempo numa condição adequada de suprimento hídrico entre os eventos de chuvas (STRECK et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2023). Nota-se, também, para solos com CAD de 51,2 mm (Figuras 1 e 2), uma maior diferença entre a mediana e os valores máximos, bem como, uma maior diferença interquartis da mediana para a o terceiro quartil, demonstrando que produtividade estimada é maior que a média em um maior número de locais simulados. Demonstrando assim, a importância da melhoria no armazenamento de água no solo para um melhor aproveitamento das chuvas e para a redução dos impactos do déficit hídrico na produtividade a soja. A qualidade do solo, do ponto de vista físico, está associada ao solo que: permite a infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas, aos córregos e à subsuperfície; responde ao manejo e resiste à degradação; permite as trocas de calor e de gases com a atmosfera e as raízes de plantas; e possibilita o crescimento das raízes (REICHERT et al., 2003).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2- Boxplot da produtividade relativa (%) final da soja estimada para 47 locais do Rio Grande do Sul média para as datas de emergência (A), para os valores de CAD do solo (B) e as durações de ciclo da soja (C).

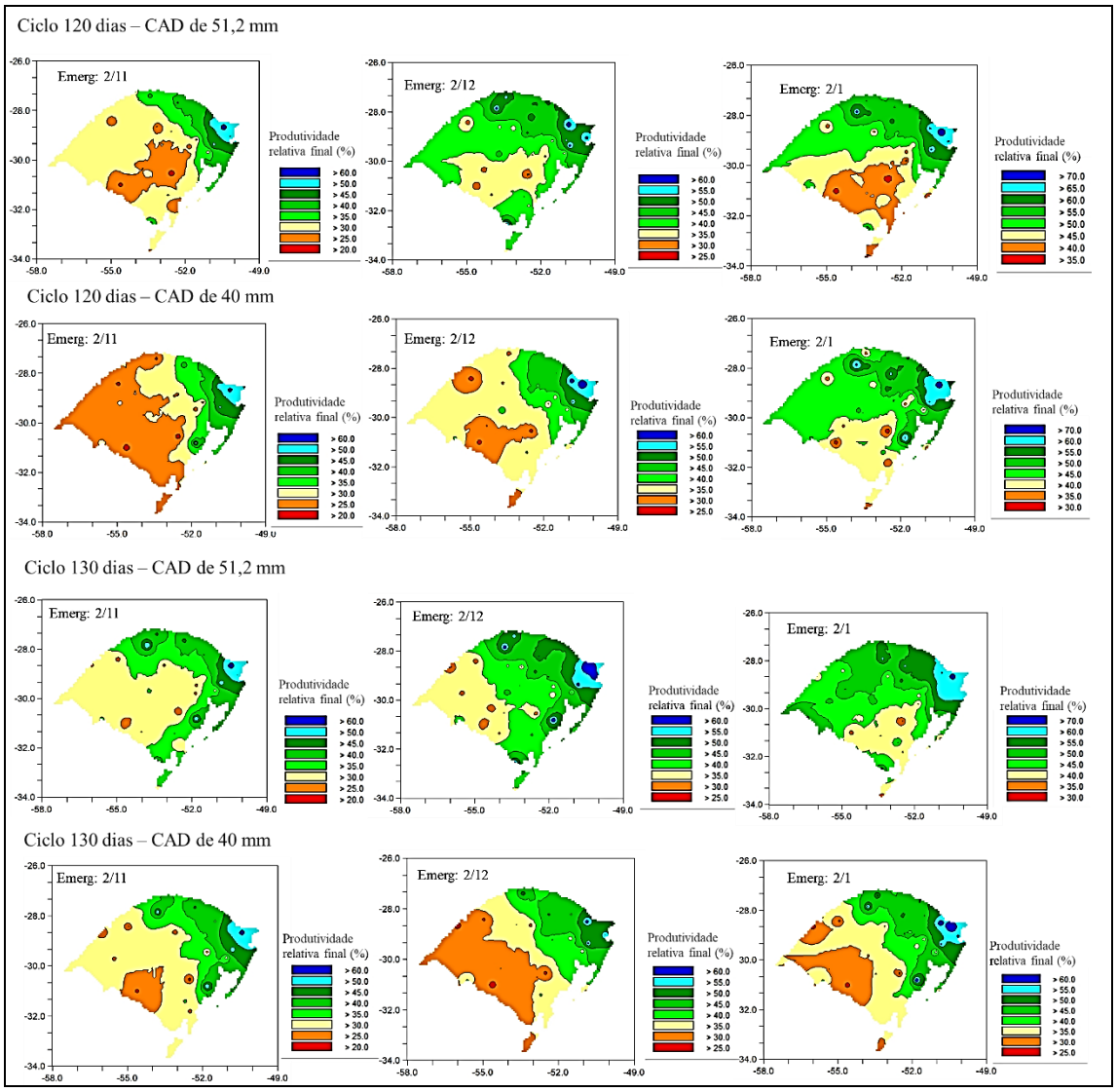


Fonte: Autores (2025).

As diferenças entre a duração do ciclo da soja (120 e 130 dias) são mais evidentes para solo com CAD de 40 mm (Figura 1), mas de um modo geral (média) o ciclo de 130 dias impactou em maior produtividade relativa da cultura (Figura 2). Em solos com menor CAD, períodos mais prolongados sem a ocorrência de chuvas podem ocasionar maior penalidade na produtividade da soja em função da deficiência hídrica. Em contrapartida, em ciclos mais tardios (130 dias), a possibilidade da cultura se recuperar do estresse é maior. As cultivares de soja no Brasil são classificadas de acordo com o GMR e apresentam uma média de 100 a 140 dias de ciclo compreendidos entre as fases vegetativa e reprodutiva (THOMAS; COSTA, 2010).

O padrão da variabilidade espacial da estimativa da produtividade final (%) da soja, para as situações simuladas, é diferente entre as datas de semeadura, valores de CAD e durações de ciclo (Figura 3) e apresenta similaridade com o padrão de distribuição de chuvas acumuladas no ciclo (Figura 4). A região oeste do estado, onde choveu menos, apresentou as produtividades mais baixas e intermediárias (>25<45%) e nas regiões de maior altitude, onde choveu mais, as produtividades foram mais elevadas, chegando em até 86%, na semeadura mais tardia. Para a semeadura mais precoce (emergência 2/11), uma porção do território a nordeste apresenta as maiores produtividades (>40%).

Figura 3- Mapas temáticos da estimativa da produtividade relativa final (%) da soja para as La Niñas (2020/21; 2021/22 e 2022/23) em diferentes datas de emergência no RS.

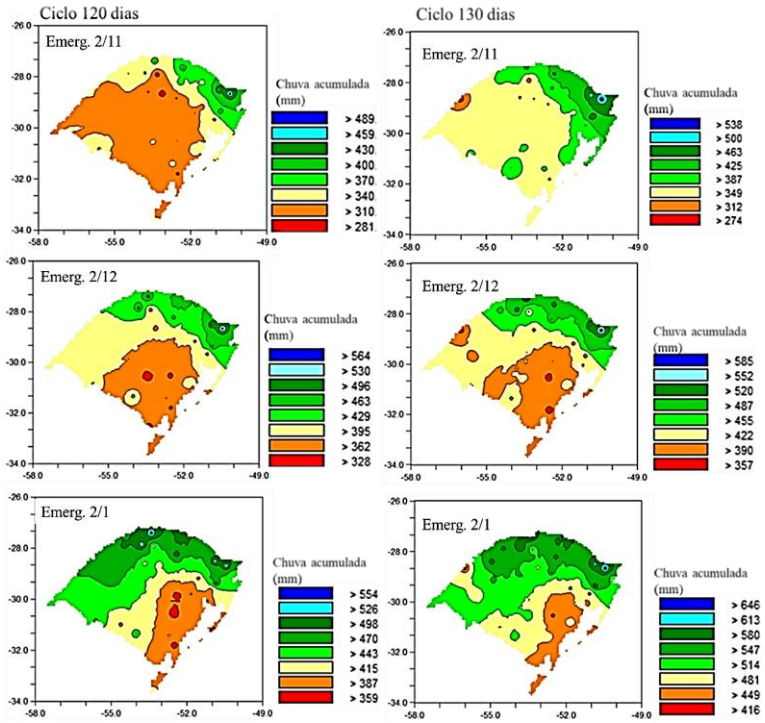


Fonte: Autores (2025).

Essa mesma tendência de espacialização mantém-se para a semeadura na data intermediária (emergência 2/12) para os solos com CAD de 40 mm (ciclo de 120 dias) e para o ciclo de 130 dias, independentemente do valor de CAD. Para a semeadura mais tardia, entre as avaliadas (emergência 2/1), o padrão de distribuição espacial que predomina, é de menor produtividade da soja na metade sul do estado (Figura 3).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 4- Mapas temáticos da chuva acumulada (mm) para soja ciclo de 120 e 130 dias, médias para as La Niñas (2020/21; 2021/22 e 2022/23) em diferentes datas de emergência no RS.



Fonte: Autores (2025).

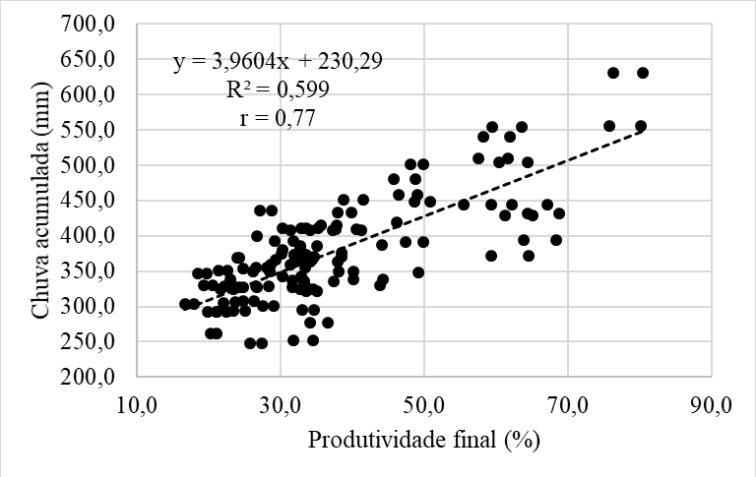
A menor produtividade relativa estimada foi para Encruzilhada do Sul, Dom Pedrito, Ibirubá e São Luiz Gonzaga, cerca de 20-25% para a semeadura mais no cedo (emergência 2/11), que evoluiu para próximo de 35% para a semeadura na data intermediária (emergência 2/12) e chegou a quase 40%, na semeadura mais tardia (emergência 2/1). As maiores produtividades são para as regiões de maior altitude, em locais nas regiões nordeste e noroeste (Bom Jesus, Cambará, Canela, Santo Augusto, Passo Fundo e Vacaria), com produtividades superiores a 60% chegando em até 86%, na semeadura mais tardia. Uma maior proporção de território (à oeste) apresenta a produtividade intermediária (>25<40%) para semeadura até 25/11 e 25/12 (solo com CAD de 51,2mm – ciclo de 130 dias). Enquanto, a depressão central e o Sul apresentam produtividades intermediárias (>25<45%) para a semeadura mais tardias (Figura 3).

O acumulado de chuvas no ciclo variou de 274 a 737 mm (Figura 4), sendo os maiores valores observados para semeaduras mais tardias e para as regiões mais ao norte e nordeste do estado, explicando as maiores produtividades nestes locais e para a semeadura no dia 25/12 (Figura 3). De acordo com Fontana; Berlato (1997), a tendência de uma anomalia mais negativa na região oeste do estado é maior em anos de La Niña, que agrava ainda mais a situação nessa região do estado. Ainda, segundo Zanon et al. (2018), para altas produtividades (>5.000 kg ha^{-1}) são necessários aproximadamente 800 mm de água ao longo do ciclo da cultura, o que não foi possível no RS, nas condições meteorológicas de anos da La Niña estudados (Figura 4).

A relação entre a produtividade relativa da soja (Figura 3) e a distribuição espacial das chuvas (Figura 4) é bastante evidente, sendo possível estabelecer uma relação linear entre ambas (Figura 5). Assim, a produtividade relativa média que foi de

27% quando os acumulados de chuva no ciclo somaram até 300 mm, subiu para 32% quando os acumulados foram entre 300 e 400 mm, atingiu 44% quando a chuva foi entre 400 e 500 mm e chegou em 65%, para acumulados de chuva entre 500 e 600 mm.

Figura 5- Relação entre chuvas acumuladas ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja e produtividade final estimada (%).



Fonte: Autores (2025).

4 CONCLUSÃO

Foi possível estabelecer até oito classes (regiões) distintas no território gaúcho em função da variabilidade espacial da produtividade relativa da soja estimada (%).

A produtividade relativa da soja estimada apresentou padrão de variabilidade espacial diferente entre as datas de semeadura, valores de CAD e duração de ciclo e manteve padrão espacial similar ao das chuvas acumuladas (mm).

A região oeste do estado, onde choveu menos, apresentou as produtividades mais baixas e intermediárias (>25<45%) e nas regiões de maior altitude, onde choveu mais, as produtividades foram mais elevadas, chegando em até 86%, na semeadura mais tardia.

Ciclos de desenvolvimento mais longos e semeaduras mais tardias podem contribuir para o aumento da produtividade relativa da soja. Além dessas estratégias, é necessário pensar em práticas de manejo que favoreçam o armazenamento de água no solo, bem como avaliar a necessidade de irrigação suplementar nas regiões mais afetadas, de modo a minimizar os impactos do déficit hídrico na produtividade da soja.

REFERÊNCIAS

ASSMAN, J. OLIVEIRA, Z, B. Simulação do balanço hídrico sequencial e da necessidade de irrigação para a cultura da soja em vinte anos agrícolas. **Irriga**, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 164–175, 2023. DOI: 10.15809/irriga.2023v28n1p164-175.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento.** 2023. Disponível em < https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/911-soja> Acesso em 25 nov. 2023.

CPTEC. **Centro de Previsões de Tempo e Estudos Climáticos**. Disponível em < http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em 25 nov. 2023.

DELWORTH, T. L; ZENG, F. The Impact of the North Atlantic Oscillation on Climate through Its Influence on the Atlantic Meridional Overturning Circulation. **Journal of climate.** V 29, 3 ed, 2016.

DOOREMBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efectos del água em rendimento de los cultivos.** Campina Grande: UFPB, 1994. (FAO, Estudos de irrigação e drenagem, 33).

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Relação entre El Nino Oscilação Sul (ENOS), precipitação e rendimento de milho no estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha,** v. 2, n. 1, p. 39-46, 25 set. 1997.

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia. **SISDAGRO- Sistema de suporte à decisão agropecuária**. Disponível em: <https://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/monitoramento/bhc>. Acesso em 02 de ago. de 2024.

KAYANO, M.T.; ANDREOLI, R.V. Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation. **International Journal of Climatology**, v.27, p.531-540. 2007.

LIMA, F. V. D., SILVINO, G. D. S., MELO, R. S. D. S., LIRA, E. C., & RIBEIRO, T. D. S. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. **Revista Caatinga**, v. 28m n.4, p.53–63, 2015.

LU, G. Y.; WONG, D. W. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. **Computers & geosciences**, Elsevier, v. 34, n. 9, p. 1044–1055, 2008.

MAPA. Ministério da Agricultura e Pecuária. Disponível em https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/produtores-realizaram-mais-de-81-mil-acionamentos-de-seguro-rural-e-proagro-devido-a-seca. Acesso em 25 nov. 23.

MATZENAUER, R.; RADIN, B.; FILHO, C. A. Rendimento de grãos de soja e de milho, no Rio Grande do Sul, não difere entre eventos El Niño Oscilação Sul. **Revista Agrometeoros,** v.26, n.1, p.123-129, 2018.

NEUMAIER, N.; et al. **Ecofisiologia da soja**. CP2. Disponível em < https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/219401/1/p.-33-54-de-SP-17-2020 online.pdf >. Acesso em 25 nov.2023.

NOOA- **National Weather Service. Climate Prediction Center**. Disponível em < https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php>. Acesso em 25 nov.2023.

ISBN 978-65-990392-6-3

OLIVEIRA, Z. B.; BARANZELLI, L. F.; KNIES, A. E. Análise da produtividade da soja em cinco anos agrícolas com a utilização da irrigação suplementar na região central do RS**. Irriga,** [S. l.], v. 28, n. 4, p. 745–755, 2023. DOI: 10.15809/irriga.2023v28n4p745-755. Disponível em: https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4756. Acesso em: 29 mar. 2025.

REDIN, B.; SCHÖNHOFEN, A.; TAZZO, I, F. Impacto da quantidade e frequência de chuva no rendimento da soja. **Agrometeoros,** Passo Fundo, v.25, n.1, p.19-26, 2017.

REICHERT, J. M.; et al. **Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas.** Ciência & Ambiente, 2003.

SANTOS, E. P.; MATIAS FILHO, I.; BRITO J. I. Influência do Índice de Oscilação Sul (IOS) e Anomalia do Niños sobre as chuvas no Nordeste Brasileiro. **Anais...** In: SBMET, 16., 2010, Belém. Anais. Belém. p. 1-4. 2010.

SANTOS, E.H.M.; GRIEBELER, N.P.; OLIVEIRA, L.F.C. Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial na bacia hidrográfica do Ribeirão João Leite-GO. Engenharia Agrícola [Internet], v.31, n.1, p. 78–89, 2011.

STRECK, E. V.; FLORES, C. A.; SCHNEIDER, P. (Clbs.) **Solos do Rio Grande do Sul.** 3. ed., rev. e ampl. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar. 252 p. il. color. ISBN 978-85-98842-20-2. Sul, p.16, 2018.

THOMAS, A. L.; COSTA, J. A**. Desenvolvimento da planta de soja e o potencial de rendimento de grãos.** In: THOMAS, A.L.; COSTA, J.A. (Ed.) Soja: manejo para alta produtividade de grãos. Porto Alegre: Evangraf, 2010, p.13-33, 248p.

UNIFEI. **Ciências Atmosféricas**. Disponível em < https://meteorologia.unifei.edu.br/>. Acesso em 20 nov. 2024.

ZANON, A.J. et al. **Ecofisiologia da soja - Visando altas produtividades.** 1. ed. Santa Maria: Palloti/ SM, 2018.

ZIPPER, S. C.; QIU, J.; KUCHARIK, C. J. Drought effects on US maize and soybean production: spatiotemporal patterns and historical changes. **Environmental Research Letters**, United Kingdom, v. 11, n.9, p.1-12,2016.

CAPÍTULO 8

CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS ATUAIS NO ANO AGRÍCOLA 2024/25 E ESTIMADAS COM O ACRÉSCIMO DA TEMPERATURA DO AR PARA A CULTURA DA SOJA

Current weather conditions in the agricultural year 2024/25 and estimated with the increase in air temperature for soybean crops

Zanandra Boff de Oliveira[1,2], Gianlucca Pigatto[1], Juliano Arthur Drescher[2], Bruno Gabriel Mayerhofer[2], Beatriz Mariana[2], Rafaela Richardt Piazza[2], Carlos Eduardo Da Silva, Gustavo Bock Bernhard[2]

[1] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Colégio Politécnico, Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão (PPGAP), Av. Roraima 1000 – Camobi, 97105-000, Santa Maria – RS, Brasil, zanandra.oliveira@ufsm.br, gianluccapigatto@hotmail.com

[2] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), campus de Cachoeira do Sul, Rod. Taufik Germano 3013 – Universitário II, 96503-205, Cachoeira do Sul – RS, zanandra.oliveira@ufsm.br, julianodrescher3@gmail.com, bruno.mayerhofer@acad.ufsm.br, beatriz.mariana@acad.ufsm.br, rafaela.piazza@acad.ufsm.br, dasilvakadu03@gmail.com, gustavo.bernhard@acad.ufsm.br.

RESUMO

Temperaturas mais altas podem acelerar a maturação das plantas de soja, resultando em um ciclo total mais curto, bem como podem levar a estresse térmico, afetando negativamente a qualidade e o rendimento dos grãos. Assim, objetivou-se avaliar a duração do ciclo de desenvolvimento, a necessidade de irrigação e os valores de temperatura do ar para a cultura da soja no ano agrícola 2024/25 e simular essas condições, mantendo as chuvas observadas, para um cenário de aumento de temperatura de 1,5ºC, na região edafoclimática de Cachoeira do Sul – RS. A cultivar Brasmax Trovão I2X (GMR 5.2) foi semeada no dia 21/11/2024, na área experimental da UFSM Cachoeira do Sul. Coletou-se informações meteorológicas e fez-se o acompanhamento fenológico da cultura que foi irrigada. O aumento de 1,5ºC na temperatura, impactou na redução de 14 dias na duração do ciclo de desenvolvimento da soja, sendo a fase reprodutiva mais influenciada que a fase vegetativa. O estresse térmico existente será agravado com a confirmação desse aumento de temperatura. A necessidade de irrigação suplementar, que nas condições avaliadas foi de 243 mm seria de 251 mm, no cenário avaliado.

Palavras-chave: *Glycine Max L.* Estresse térmico. Mudança climática.

ABSTRACT

Higher temperatures can accelerate soybean maturation, resulting in a shorter overall cycle, and can also lead to heat stress, negatively affecting grain quality and yield. Therefore, this study aimed to evaluate the development cycle length, irrigation requirements, and air temperatures for soybean crops in the 2024/25 agricultural year. Simulate these conditions, maintaining the observed rainfall, for a 1.5°C temperature increase in the soil and climate region of Cachoeira do Sul, RS. The Brasmax Trovão I2X (GMR 5.2) cultivar was sown on November 21, 2024, in the experimental area of UFSM Cachoeira do Sul. Meteorological data were collected, and phenological data of the irrigated crop were monitored. The 1.5°C temperature increase resulted in a 14-day reduction in the soybean development cycle, with the reproductive

phase being more affected than the vegetative phase. The existing heat stress will be exacerbated by the confirmation of this temperature increase. The need for supplemental irrigation, which was 243 mm under the conditions evaluated, would be 251 mm under the evaluated scenario.

Keywords: *Glycine Max* L. Estresse térmico. Climate change.

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* M.) é uma das principais culturas de verão do Brasil e desempenha um papel importante na economia, especialmente no estado do Rio Grande do Sul, sendo a cultura com maior área cultivada no estado e cada vez mais ocupando áreas de outras culturas, devido a sua grande demanda, desde a alimentação humana e animal, até usos industriais (APROSOJA, 2025; EMBRAPA 2021). O aumento da demanda por alimentos para suprir o constante crescimento da população humana, aliado a um contexto global de mudanças climáticas (aquecimento global) representaram um grande desafio para a produção agrícola (IPCC, 2014; TAMIRU; FEKADU, 2019). No mesmo tempo em que há uma necessidade real de intensificação da produção agrícola, há também, a necessidade do uso de abordagens tecnológicas cada vez mais sustentáveis.

A cultura da soja, por ser sensível a variações climáticas, enfrenta desafios importantes relacionados ao clima, que podem afetar o desenvolvimento e a produtividade. A variabilidade da chuva, por exemplo, é um fator crítico, especialmente durante os períodos de germinação-emergência e floração-enchimento de vagens. A temperatura do ar tem um impacto significativo no desenvolvimento e produtividade da cultura da soja. A faixa ideal de temperatura para a soja situa-se entre 20°C e 30°C, com 30°C sendo considerada ótima para o desenvolvimento. Temperaturas abaixo de 10°C podem prejudicar a germinação e o crescimento, enquanto temperaturas acima de 30°C, especialmente por períodos prolongados, podem causar estresse térmico e reduzir o rendimento (FARIAS; NEUMAR; NEPOMUCENO, 2021).

A mudança climática, com o aumento das temperaturas, representa uma preocupação crescente para a cultura da soja, afetando seu desenvolvimento, produtividade e, consequentemente, a segurança alimentar. Segundo o IPCC (2021), a temperatura média global pode aumentar em 1,5 ºC até o final do século e alguns cenários já preveem que esse limite pode ser ultrapassado mais cedo.

A elevação das temperaturas pode reduzir o período de crescimento da planta, diminuir o rendimento dos grãos e aumentar a ocorrência de doenças. Embora, o aumento da concentração de CO_2 atmosférico, substrato primário para fotossíntese, contribui para o aumento da taxa de crescimento (TAIZ; ZEIGER, 2013), beneficiando principalmente plantas com metabolismo C_3, como é o caso da soja (TUBIELLO et al., 2000; STRECK et al., 2005). Dorneles Junior; Prado (2015) observaram em seu estudo que plantas de soja apresentaram maiores teores de assimilação líquida de CO_2, de condutância estomática, eficiência do uso de água, área foliar, número de trifólios e de total de vagens (61% maior) quando submetidas ao aumento da concentração de CO_2 (800 ppm). Porém, nessas condições, a soja acelerou seu ciclo fisiológico em 8%, alcançando mais rapidamente os estádios fenológicos na fase

vegetativa e reprodutiva, e maior desenvolvimento de percevejo-marrom (MIRANDA et al., 2015; DORNELES JUNIOR, 2017).

O aumento da temperatura, também, prejudica a fixação biológica de nitrogênio (FBN) na soja, especialmente com temperaturas do solo acima de 30°C, que afetam negativamente a atividade do rizóbio, a formação e a eficiência dos nódulos nas raízes, e a própria simbiose entre planta e bactéria. A fixação de nitrogênio (N) é um processo termossensível, e temperaturas extremas, principalmente máximas diurnas superiores a 33°C, podem reduzir a iniciação e a eficácia da nodulação, comprometendo a capacidade da soja de obter o nitrogênio necessário para seu desenvolvimento (GELLETI et al., 1971).

Assim, o monitoramento de indicadores climáticos é crucial na agricultura de precisão, pois fornece dados para otimizar o manejo das culturas através de tecnologias como estações meteorológicas e sensoriamento remoto. Ao analisar fatores como temperatura, umidade, precipitação e radiação solar, os agricultores podem prever riscos, planejar a irrigação, identificar pragas e doenças, e tomar decisões mais assertivas para aumentar a produtividade e a sustentabilidade. Dessa forma, objetivou-se avaliar a duração do ciclo de desenvolvimento, a necessidade de irrigação e os valores de temperatura do ar (máximas e mínimas) para a cultura da soja no ano agrícola 2024/25 e simular essas condições, mantendo as chuvas observadas, para um cenário de aumento de temperatura de 1,5ºC, na região edafoclimática de Cachoeira do Sul – RS.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi instalado no ano agrícola 2024/25 na área experimental da UFSM Cachoeira do Sul (longitude de -52,96, latitude de -30,01 e altitude de 79,2 m), cujo solo é um Argissolo Vermelho. O trabalho foi conduzido em delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro tratamentos e seis repetições, totalizando 24 parcelas experimentais. A área de cada parcela experimental foi de 7,5 m^2. Os tratamentos constituíram de diferentes estratégias de irrigação suplementar: irrigação durante todo o ciclo (T1); irrigação a partir de R1 (T2); irrigação a partir de R3 (T3); sem irrigação – sequeiro(T4). Mas, para esse estudo será levado em consideração os resultados obtidos no T1.

A semeadura da cultivar Brasmax Trovão I2X (GMR 5.2) foi no dia 21/11/2024 com conjunto trator/semeadora utilizando-se o espaçamento entrelinhas de 0,50m e 14,7 sementes por metro linear em sistema de plantio direto, sobre resíduos vegetais de aveia branca. As sementes foram inoculadas com bactérias do gênero *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* e a adubação de base foi de 300 kg ha^{-1} da fórmula comercial 4-28-28 (N-P-K). Os demais manejos seguiram as recomendações agronômicas para a cultura.

A irrigação foi por um sistema de gotejamento superficial instalado na entrelinha de cultivo, com espaçamento entre emissores de 0,2 m. O manejo da irrigação baseou-se no balanço hídrico do solo, para manter a capacidade de água disponível (CAD) com a fração de esgotamento de 40%, variável em função da evolução do sistema radicular da cultura de 10 a 35 cm. Os dados meteorológicos foram obtidos de uma estação automática (Metos-Brasil), instalada a cerca de 50 m do local do experimento. A evapotranspiração de referência (ETo) foi estimada pelo

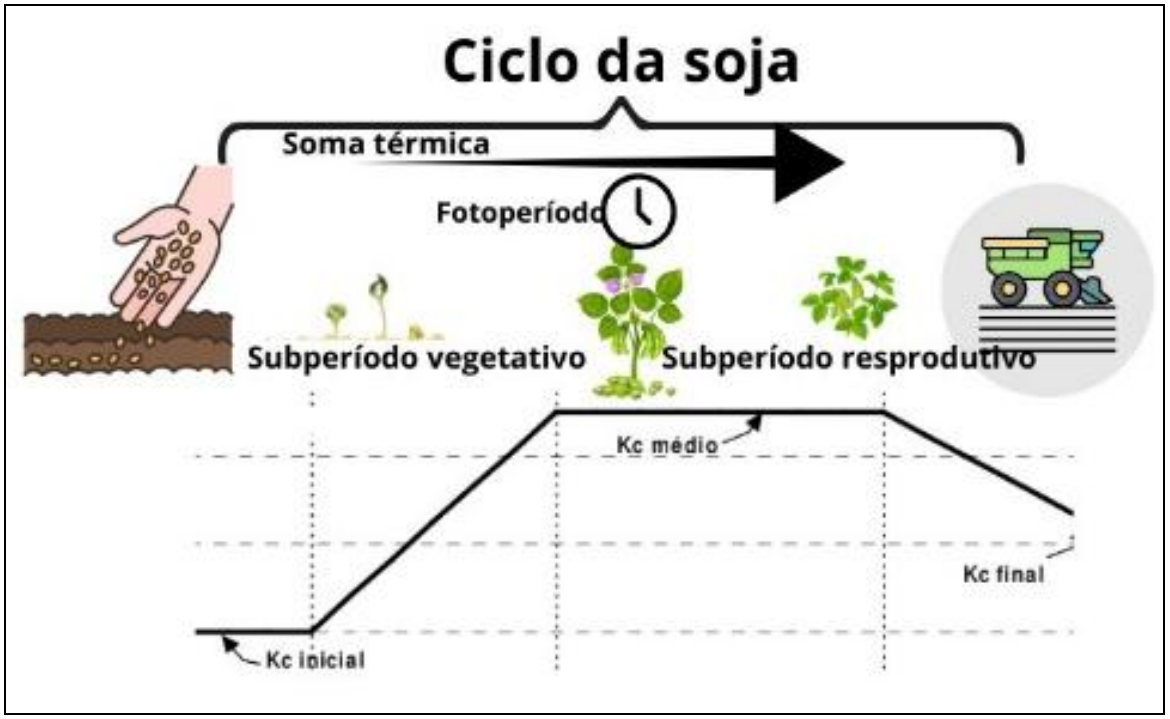
ISBN 978-65-990392-6-3

método de Penman-Monteith-FAO (PM-FAO) com dados apenas de temperatura (ALLEN et al., 1998). A evapotranspiração da cultura (ETc), foi obtida pela multiplicação da ETo pelo coeficiente de cultivo (Kc). O cálculo do Kc simples levou em consideração a fração de cobertura do dossel (Fc), que indica o ponto de inflexão e deflexão na curva do Kc (ALLEN et al., 1998).

Realizou-se a análise fenológica das plantas duas vezes para o acompanhamento dos estádios fenológicos ao longo do ciclo de desenvolvimento. O cálculo da soma térmica diária (STd) foi realizado com a temperatura média do ar diária (ºC) subtraída da temperatura basal inferior da cultura (10ºC) e partir do somatório desta, calculou-se a soma térmica acumulada (ST ac) em graus dias acumulados (GDA, Cº), para o subperíodo da semeadura – floração (SE – R1) e para o ciclo total (SE-COL).

De posse das informações obtidas durante a condução do estudo de campo adicionou-se 1,5ºC nos valores de temperatura (média, máxima e mínima) e observou-se as novas datas para que a cultura atingisse o estádio fenológico de R1, a nova data de colheita e as novas datas para o ajuste da curva do Kc. Para a estimativa do R1, considerou-se também, o fotoperíodo. Pois, a soja é uma planta de dia curto e floresce em um comprimento do dia menor que o crítico, que foi avaliado no experimento de campo como inferior a 14,9 h para a cultivar analisada. Portanto, a condição para que a cultivar estrasse em R1 foi atingir a ST ac e o fotoperíodo do dia estar menor que o crítico. Posteriormente, um novo ajuste do Kc e o cálculo da ETo com os dados de temperatura modificados. Dessa forma, realizou-se o cálculo da necessidade da irrigação nesse cenário proposto. A Figura 1 ilustra os pressupostos utilizados para as estimativas.

Figura 1 – Representação esquemática dos conceitos utilizados para a estimativa das etapas do ciclo do desenvolvimento da soja e da curva do Kc.



Fonte: Autores (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados na Tabela 1 demonstram a redução de quatro dias para o início da floração da soja (R1) e de 14 dias na duração total do ciclo (semeadura a colheita), em função do aumento da STac. A STac influencia a duração do período juvenil da soja ao acelerar o desenvolvimento da planta em temperaturas elevadas, enquanto o fotoperíodo, por sua vez, determina a indução do florescimento após a fase juvenil, o que acontece na região a partir do dia 4/jan. A sensibilidade ao fotoperíodo é característica variável entre cultivares, ou seja, cada cultivar possui seu fotoperíodo crítico, acima do qual o florescimento é atrasado (EMBRAPA, 2021).

A temperatura máxima para o ciclo (2024/25) que já foi elevada de 39,47 pode chegar a 40,97°C (Figura 2). Portanto, a condição atual que já está com temperaturas fora do limiar adequado para o bom desenvolvimento da cultura da soja, visto que em 73% do período do ciclo a temperatura máxima ultrapassou os 30ºC, considerada com um valor ótimo para o bom desenvolvimento da cultura (FARIAS; NEUMAR; NEPOMUCENO, 2021), terá essa condição agravada. Pois, no cenário aplicado, em 79% do período do ciclo a temperatura máxima permanecerá acima dos 30ºC (Figura 2). As altas temperaturas podem levar à deficiência de nitrogênio (N), essencial para a formação de vagens e grãos, afetando a qualidade dos grãos e o vigor das sementes. A resistência ao calor ajuda a mitigar esses efeitos negativos. Portanto, nessas condições de variabilidade climática é importante selecionar cultivares que toleram o calor (EMBRAPA, 2010).

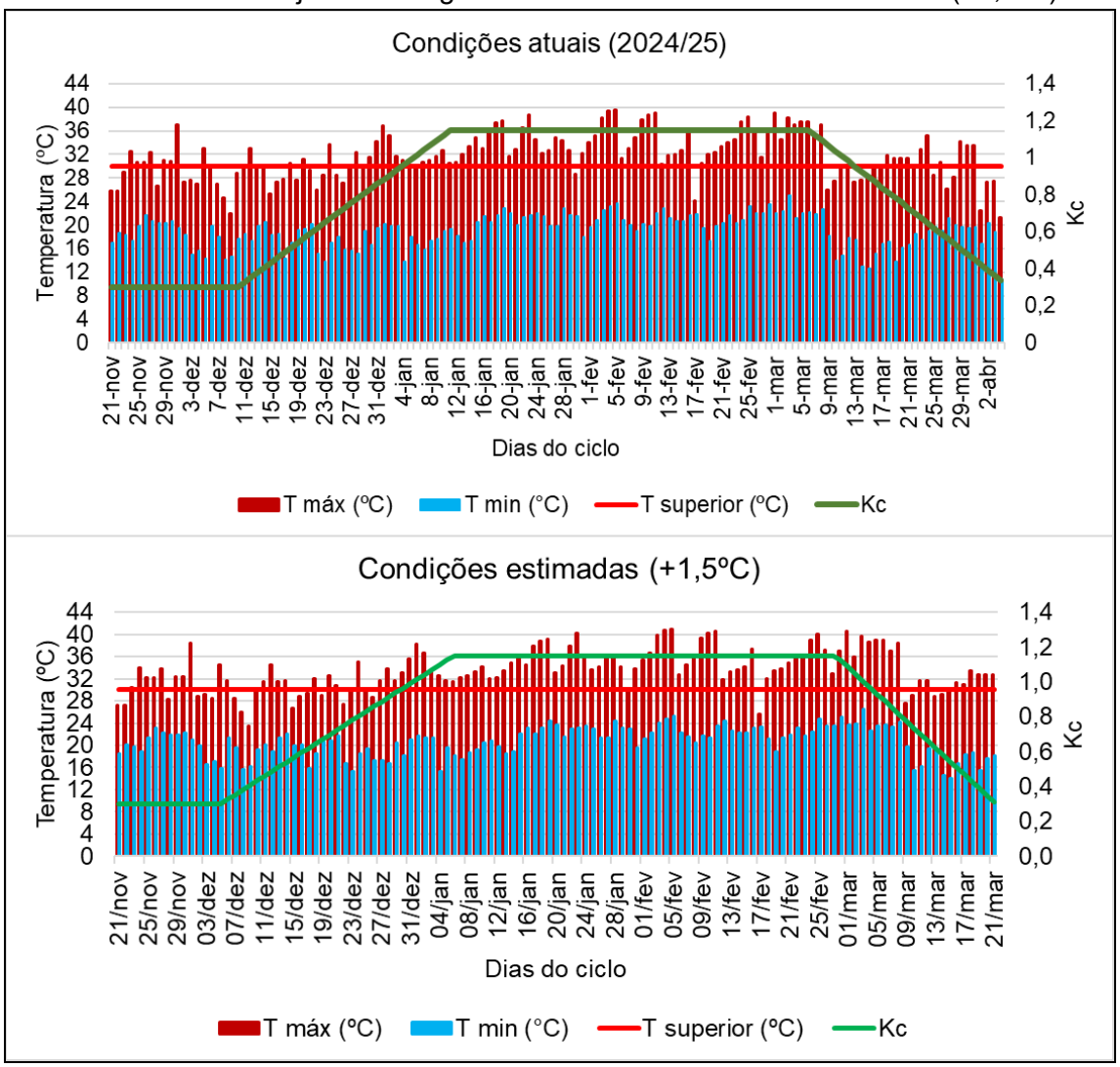
Tabela 1 – Etapa do ciclo da cultura da soja utilizada para a definição da evolução da curva do Kc, datas de ocorrência e soma térmica acumulada para o período.

Fase do ciclo (Kc)	Ciclo 2024/25		Estimadas	
	Data	ST ac.*	Data	ST ac.
Semeadura	21/11/2024		21/11	
10% do fechamento da entrelinha de cultivo (V3)	10/12/2024	259,0	06/12	259,0
100% do fechamento da entrelinha de cultivo (R1)	10/01/2025	675,0	06/01	675,0
Início da senescência (R7)	07/03/2025	1.608,0	27/02	1.608,0
Colheita (R9)	04/04/2025	1.960,6	21/03	1.960,6

Em que: ST ac, soma térmica (GDA,ºC)

Fonte: Autores (2025).

Figura 2 – Valores de temperatura do ar observados durante o ciclo de desenvolvimento da soja no ano agrícola 2024-25 e estimadas no cenário (+1,5ºC).



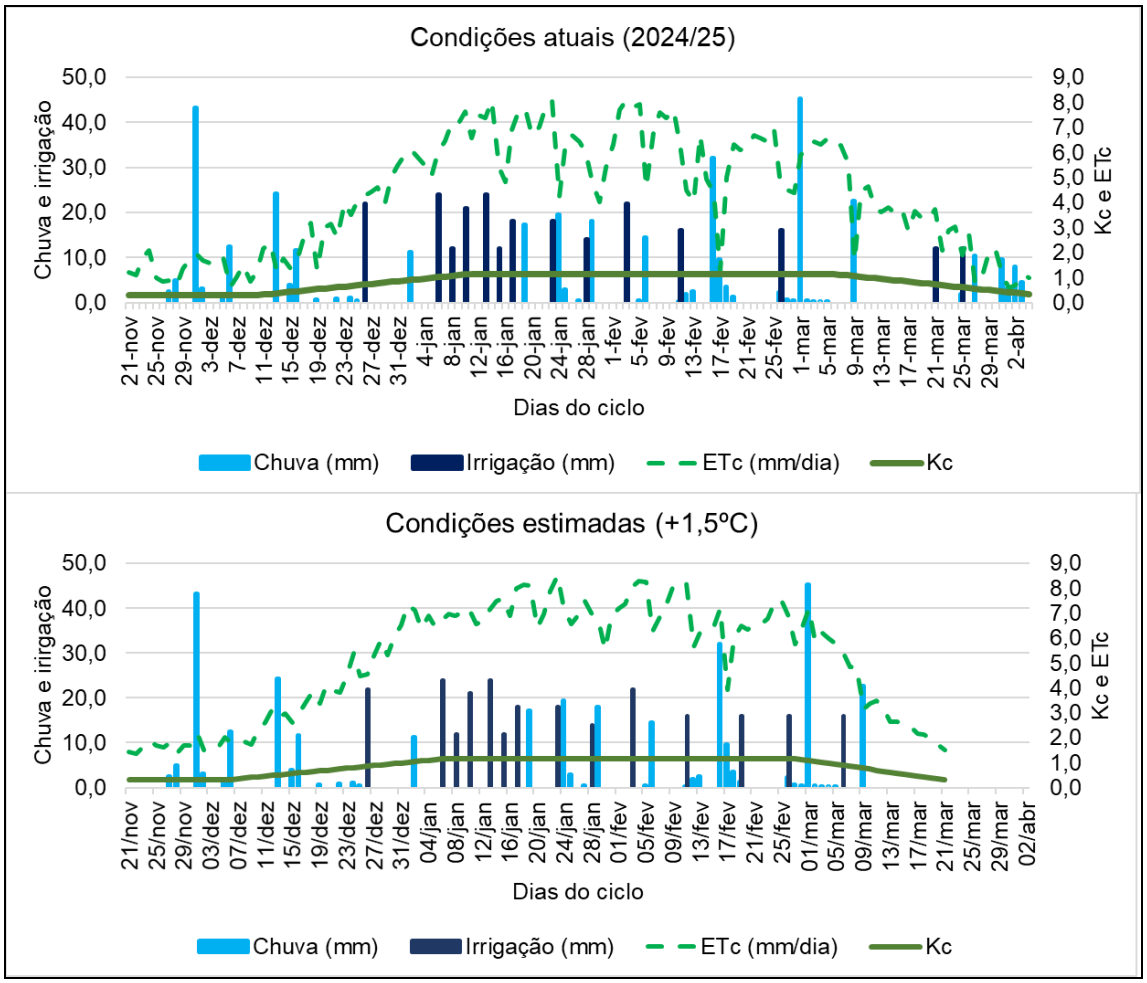
Fonte: Autores (2025).

Temperaturas acima de 38 ºC, que nas condições atuais foram registradas em 9 dias, passarão para 19 dias ao longo do ciclo (Figura 2). Essas temperaturas, no início do crescimento, são prejudiciais, reduzindo a formação de nós e causando o crescimento dos entrenós. A queda de flores e vagens é maior em altas temperaturas e pode causar reduções substanciais na produtividade. Pode também ocorrer florescimento precoce e redução da altura de plantas. Esse problema pode se agravar se houver insuficiência hídrica e/ou fotoperiódica, durante a fase de crescimento. Altas temperaturas podem acelerar a maturação e afetar a qualidade dos grãos, favorecendo o aumento no conteúdo de óleo, em detrimento do conteúdo de proteína (CENTURION; GHINI, 2008). Ademais, espera-se um aumento na pressão de pragas e doenças na cultura da soja, devido à aceleração do ciclo de vida de insetos e à proliferação de patógenos, especialmente doenças fúngicas e bacterianas, com o aumento das temperaturas e mudanças nos padrões de chuva (EMBRAPA, 2025).

O aumento da temperatura no cenário avaliado influenciou na elevação da ETc diária (Figura 3), em função do aumento da ETo, o que já era esperado. Conforme demonstra a Figura 4, a ETo e a temperatura máxima do ar possuem uma relação

linear direta. Bem como, o coeficiente de Pearson (r), indica forte correlação entre a duas variáveis (Figura 4).

Figura 3 – Parâmetros do balanço hídrico observados durante o ciclo de desenvolvimento da soja no ano agrícola 2024-25 e estimadas no cenário (+1,5ºC).



Fonte: Autores (2025).

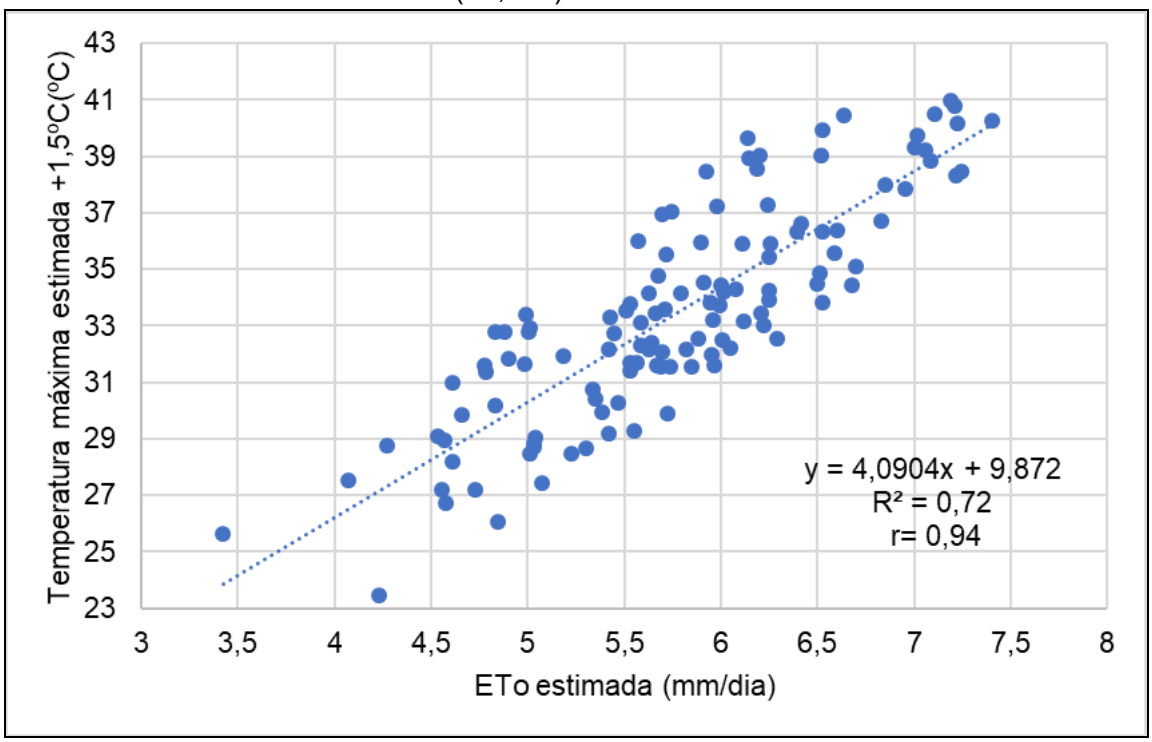
Corroborando com Oliveira (2015), que em seu estudo conduzido em Santa Maria – RS, identificou a temperatura máxima do ar como a variável meteorológica com maior associação com a ETo. Portanto, significa um maior consumo hídrico, pois a ETo representa a demanda hídrica da atmosfera sob condições ideais, ou seja, a quantidade de água que seria perdida para a atmosfera em um tipo específico de superfície, como um gramado, na ausência de deficiência hídrica (ALLEN et al., 1998). Entretanto, em função do encurtamento do ciclo, a ETc acumulada por etapa e no período total (Tabela 2), foi um pouco maior (613,5 mm) que nas condições atuais (607,2 mm).

Além da modificação na ETc, houve modificações no aproveitamento das chuvas ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura (Figura 3 e Tabela 2). Na figura 2, fica bem evidente que a aceleração do ciclo, faz com que as chuvas de dezembro, sejam mais bem aproveitadas na fase de desenvolvimento vegetativo. Por outro lado, o déficit hídrico que ocorreu na fase reprodutiva (média) é agravado no cenário de aumento da temperatura (Figura 3 e Tabela 2), onde ocorre a maior demanda por irrigações suplementares. O déficit hídrico é o fator principal na perda de

ISBN 978-65-990392-6-3

produtividade da soja (SILVA et al., 2020), principalmente na fase reprodutiva, em função do abortamento das flores e vagens, além de diminuir o tamanho e o peso dos grãos (KUSS, 2006).

Figura 4 – Relação entre temperatura máxima do ar e evapotranspiração de referência e estimadas no cenário (+1,5ºC).



Fonte: Autores (2025).

A baixa disponibilidade hídrica pelas chuvas nesse ano agrícola, que foram suficientes para suprir a demanda hídrica da cultura apenas na fase inicial do ciclo (Figura 3 e Tabela 2), gerou alta demanda por irrigações suplementares com lâmina acumulada de 243 mm, concentrada (140 mm) na fase reprodutiva (Kc médio da cultura), quando a ETc diária chegou próxima a 8 mm dia^{-1} (Figura 3), em função dos altos valores de temperatura (Figura 2). Enquanto, no cenário avaliado, a redução do ciclo de desenvolvimento, fez com que a necessidade de irrigação suplementar ficasse concentrada praticamente toda na fase reprodutiva, com um acumulado nessa fase de 213 mm e no total do ciclo de 251,0 mm. Valores estes dentro do esperado para região, pois Assmann; Oliveira (2023), verificaram para 20 anos agrícolas (2001 a 2022) em Cachoeira do Sul –RS, que a necessidade de irrigação para a cultura da soja varia entre 75 e 345 mm, sendo necessária em todos os nãos agrícolas, com maior demanda em anos sob a influência da La Niña.

Os resultados apresentados demonstram a importância da irrigação para mitigar as mudanças climáticas. A água aplicada através da irrigação resfria o solo e o ar ao redor da planta, reduzindo o estresse térmico, demonstrado nesse estudo. Assim, pode contribuir para a melhoria na fixação biológica de N, mantendo às condições nutricionais adequadas às plantas, além de favorecer para um microclima mais favorável. Portanto, mesmo em condições meteorológicas adversaras, a irrigação pode aumentar a produtividade agrícola, o que pode levar a um maior sequestro de carbono no solo e à redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) da

agricultura. Dessa forma, ressalta-se a importância dessa ferramenta como estratégica de adaptação às mudanças climáticas.

Tabela 2 – Valores acumulados de chuva, irrigação e evapotranspiração para etapa (Kc) durante para o ciclo de desenvolvimento da soja.

Atual (ano agrícola 2024/25)				
Fase do ciclo (Kc)	**Chuva (mm)**	**Irrigação (mm)**	**Total de água (mm)**	**ETc (mm)**
Inicial	67,2	0,0	67,2	31,3
Cresc. Vegetativo	53,6	79,0	132,6	129,0
Média	172,6	140,0	312,6	371,6
Final	60,2	24,0	84,2	75,3
Soma	353,6	243,0	596,6	607,2
Estimadas (+1,5ºC)				
Fase do ciclo (Kc)	**Chuva (mm)**	**Irrigação (mm)**	**Total de água (mm)**	**ETc (mm)**
Inicial	54,8	0,0	54,8	25,0
Cresc. Vegetativo	66,0	22,0	88,0	131,2
Média	126,0	213,0	339,0	371,8
Final	69,2	16,0	85,2	85,5
Soma	316,0	251,0	567,0	613,5

Fonte: Autores (2025).

4 CONCLUSÃO

Para a cultivar avaliada (GMR 5.2) e data de semeadura de 21 de novembro, o aumento de 1,5ºC na temperatura, impactou na redução de 14 dias na duração do ciclo de desenvolvimento da soja, sendo a fase reprodutiva mais influenciada que a fase vegetativa.

O estresse térmico existente será agravado com a confirmação desse aumento de temperatura. Visto que, a temperatura máxima para o ciclo (2024/25) que já foi elevada de 39,47 pode chegar a 40,97°C. Além disso, os 73% do período do ciclo em que a temperatura máxima ultrapassou limite ótimo para a cultura de 30ºC, poderá ser de 79% nesse cenário de aumento de temperatura (+1,5°C).

A necessidade de irrigação suplementar, que nas condições do ano agrícola 2024-25 foi de 243 mm seria de 251 mm no cenário avaliado, este pequeno acréscimo deve-se ao fato do encurtamento do ciclo compensar o aumento da evapotranspiração de referência.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ISBN 978-65-990392-6-3

ASSMAN, J. OLIVEIRA, Z, B. Simulação do balanço hídrico sequencial e da necessidade de irrigação para a cultura da soja em vinte anos agrícolas. **Irriga**, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 164–175, 2023. DOI: 10.15809/irriga.2023v28n1p164-175.

APROSOJA BRASIL ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE SOJA. A Soja. Disponível em: https://aprosojabrasil.com.br/a-soja/. Acesso em: 29 abr. 2025.

CENTURION, M. A. P. da C.; GHINI, R. **Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças e o desenvolvimento da soja no Brasil.**Parte de livro (capítulos de livros, trabalhos e resumos publicados em anais ou em coletâneas). Embrapa meio ambiente, 2008. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/14223/1/2008CL39.pdf. Acesso 12 ago. 2025.

DORNELES JUNIOR, J.; PRADO, S. S. **Influência da adição de CO_2 em plantas de *Glycine max* (L.) Merril**l.In: Simposio de Ecofisiologia Aplicada a Agricultura, 1., 2015, Botucatu. Anais... Botucatu:Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, 2015.

DORNELES JUNIOR, J. Desenvolvimento de Euschistus heros (Hemiptera: Pentatomidae) em ambiente enriquecido com CO_2 . 2017. 58 f. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia/Proteção de Plantas) - Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus Botucatu, Botucatu. Disponível em: http://hdl.handle.net/11449/150033. Acesso em: 12 ago. 2025.

EMBRAPA. **Soja na Alimentação, 2021**. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pos-producao/soja-na-alimentacao. Acesso em 08 ago. 2025.

EMBRAPA. **A escolha certa da cultivar de soja**. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/875002/1/art045.pdf. Acesso em: 12 ago. 2025.

EMBRAPA. **Doenças em lavouras devem se intensificar com as mudanças climáticas, alerta Embrapa**. Embrapa notícias, 2025. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/99781504/doencas-em-lavouras-devem-se-intensificar-com-as-mudancas-climaticas-alerta-embrapa#:~:text=dos%20casos%20avaliados.-,Mais%20calor%2C%20mais%20doen%C3%A7as,desafios%20impostos%20pelas%20mudan%C3%A7as%20clim%C3%A1ticas. Acesso em 08 ago. 2025.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, (Embrapa Soja. Circular técnica, 48), 2007.Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/470308. Acesso em: 12 ago. 2025.

GALETTI, P.; FRANCO, A.; AZEVEDO, H.; DÖBEREINER, J. Efeito da temperatura do solo na simbiose da soja anual**. Pesquisa. agropecuária brasileira**, Sér. Agron., 6:1-8. 1971

IPCC. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change.** Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.

IPCC. **Mudança do Clima 2021 A Base Científica.** Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Dipsonível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC_mudanca2.pdf. Acesso em 08 ago. 2025.

KUSS, R. C. R. Populações de plantas e estratégias de irrigação na cultura da soja. **Dissertação (**Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria – Área de Concentração em Engenharia de Água e solo. Santa Maria – RS, 2006.

MIRANDA, T.M.; DORNELES JUNIOR, J.; PRADO, S. DE S. Impacto do aumento do CO_2 no percevejo marrom, Euschistus heros. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 9.,2015, Campinas. **Anais...** Campinas: IAC, 2015. 7 p

OLIVEIRA, Z.B. Estimated Evapotranspiration Forecast Of Daily Data From Weather. 2015. 95 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SILVA, L.P.; BATTISTI, R.; KNAPP, F. M.; SANTOS, T. G.; ALVES JUNIOR, J. Estimativa da produtividade de soja usando irrigação na época das chuvas no bioma Cerrado. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.28, e.026702, 2020.

STRECK, N.A.; TIBOLA, T.; LAGO, I.; BURIOL, G.A.; HELDWEIN, A.B.; SCHNEIDER, F.M.; ZAGO, V. Estimativa do plastocrono em meloeiro (Cucumis melo L.) cultivado

ISBN 978-65-990392-6-3

em estufa plástica em diferentes épocas do ano. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.6, p.1275-1280, 2005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal.** 5.ed. Porto Alegre: Artemed, p. 954, 2013.

TAMIRU, L., & FEKADU, H. Effects of climate change variability on agricultural productivity. International. Journal of **Environmental Sciences & Natural Resources**, v.17, n.1, 2019.

TUBIELLO, F.N. et al. Effects of climate change and elevated CO_2 on cropping systems: model predictions at two Italian locations. **European Journal of Agronomy**, v.13, p.179-189, 2000.

CAPÍTULO 9

RESISTÊNCIA DO SOLO A PENETRAÇÃO DIAGNOSTICADA EM GRADE AMOSTRAL E EM AMBIENTES DE PRODUÇÃO

Soil Resistance To Penetration Diagnosed In Sampling Grid And In Production Environments

Julio Gustavo Buchholz[1]; Antonio Luís Santi[1]; Antonio Gutheli[1]; Renan da Rosa; André Felipe De Conti[1]; João Vitor Heaflinger[1]; Willian José Junges[1]; Igor Cotica Gnoatto[1]

[1] Universidade Federal de Santa Maria – Campus Frederico Westphalen – Departamento de Ciências Agrárias, BR386 Km Linha 7 de Se, 98400000, Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul, Brasil, julio.buchholz@acad.ufsm.br, santi_pratica@yahoo.com, antônio.gutheil@gmail.com, renandarosa1@gmail.com, decontiagro@gmail.com, joao.haeflinger@acad.ufsm.br, william.junges@acad.ufsm.br

RESUMO

O georreferenciamento é uma importante ferramenta na agricultura de precisão, assumindo a finalidade da investigação da variabilidade de uma lavoura. A resistência do solo à penetração é uma forma avaliar o nível de compactação de um solo agrícola. O objetivo desse trabalho foi avaliar a amostragem da resistência do solo a penetração baseada em malha amostral comparada a amostragem em ambiente de produção. O estudo foi realizado em nove áreas agrícolas (766 ha e 840 pontos). Foram realizadas avaliações de resistência do solo à penetração em amostragens por grade (100 x 100 m) e amostragens por ambientes definindo três ambientes de produção. As avaliações foram procedidas com um penetrômetro que efetua a leitura a cada centímetro de solo, até 0,60 m de profundidade (4 amostras por ponto amostral). Também foi coletado solo para quantificação do teor de argila. Os resultados obtidos de argila e de resistência do solo à penetração, assumiram variabilidade espacial e vertical na maioria das áreas estudadas. Quando se compara as amostragens realizada em grade com as de ambientes de produção, assume baixo nível de diferenciação.

Palavras-chave: amostragem por ambiente. Amostragem por grade. Resistência à penetração.

ABSTRACT

Georeferencing is an important tool in precision agriculture, assuming the purpose of investigating the variability of a crop. Soil resistance to penetration is one way to assess the level of compaction of an agricultural soil. The objective of this work was to evaluate the sampling of soil resistance to penetration based on sampling mesh compared to sampling in a production environment. The study was carried out in nine agricultural areas (766 ha and 840 points). Soil resistance to penetration evaluations were carried out in grid sampling (100 x 100 m) and sampling by environment, defining three production environments. The evaluations were carried out with a penetrometer that reads every centimeter of soil, up to 0.60 m depth (4 samples per sampling point). Soil was also collected to quantify the clay content. The results obtained from clay and soil resistance to penetration assumed spatial and vertical variability in most of the studied areas. When comparing grid sampling with that of production environments, it assumes a low level of differentiation.

Keywords: Sampling by environment. Grid sampling. Resistance to penetration.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto (SPD) tem suma importância para a agricultura brasileira por dispensar o revolvimento do solo e preservar a cobertura vegetal com emprego de rotação de cultura, assim promovendo marcantes alterações qualitativas no sistema (FREIRE; VASCONCELLOS; FRANÇA, 2001). Conforme Santi et al. (2014a) este sistema visa a conservação do solo e a sustentabilidade do ambiente agrícola. Por tanto os diferentes pesquisadores da área e seus trabalhos mostram com propriedade a relevância deste sistema.

Após o importante momento da adoção do SPD, um novo cenário agrícola começou a tomar forma, chamado de Agricultura de Precisão (AP), tendo o mesmo propósito de sustentabilidade, porém com a intenção de compreender as diferentes causas da variabilidade de uma lavoura. Assim surge a AP no Brasil a partir de 1998 com o mapeamento da produtividade das culturas de grãos (MANTOVANI; COELHO; MATOSO, 2005), essa forma da aplicação de tecnologia foi fundamentada no gerenciamento da variabilidade espacial e temporal, a fim de melhorar o desempenho das culturas e a qualidade ambiental, de forma a associar todos os aspectos da produção agrícola (PIERCE, NOWAK, 1999). Esta ascensão da AP foi possível a partir do georreferenciamento das áreas agrícolas. Conforme Cherubin et al. (2016) em escala comercial, no Brasil a amostragem georreferenciada é a principal ferramenta de AP.

Um procedimento muito utilizado a partir dos avanços no conhecimento da AP, em especial o georreferenciamento, é a amostragem em grade. Esta forma de realizar a amostragem em uma lavoura, objetiva caracterizar o todo de uma área ou talhão a partir da avaliação de apenas uma pequena porção representativa do mesmo (COLAÇO; MOLIN, 2014), através da elaboração de malhas ou grids amostrais com auxílio de programas computacionais da AP.

Com os estudos e metodologias propostos na AP, conhecimentos dos profissionais do meio, surgiu uma valiosa forma de gestão na propriedade rural, a fim de estimar diferentes ambientes de produção em um mesmo “talhão”. Esta gestão pode ser chamada de zonas de manejo (ZM) ou unidade de gestão diferenciada (UGD), cujo significado de ambos os termos é definir os locais da lavoura que retratam um conjunto de características semelhantes permitindo o seu agrupamento em ambientes de produção (EITELWEIN et al., 2016). Estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de diferenciar zonas de manejo, baseando-se no desempenho nas plantas em campo, histórico de mapeamento da produtividade (SCHWALBERT; CORASSA; AMADO, 2016), bem como utilizando-se informações sobre relevo e características do solo (EITELWEIN et al., 2016).

O mapeamento das propriedades físicas do solo é outra forma analítica disponibilizada pela AP e a maneira de questionar as causas da variabilidade de uma área. Entre os atributos físicos do solo com potencial para a detecção da variabilidade espacial na escala de lavoura comercial, destaca-se a resistência a penetração (RP), como sendo uma forma de avaliar o nível de compactação do solo (TORMENA; ROLOFF, 1996).

A RP trata-se da resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele, como uma raiz em crescimento ou uma ferramenta de cultivo e seus valores podem ser observados em kilopascal (kPa). Qualquer alteração significativa que ocorra na estrutura do solo por algum processo (exemplo o efeito da compactação) provocará mudanças na resistência mecânica deste e no próprio

crescimento das plantas (PEDROTTI et al., 2001). Os valores de RP têm importância no que diz respeito ao crescimento radicular, segundo Taylor, Roberson e Parker Jr. (1966), mostra que muitos pesquisadores, utilizam o valor de 2.0 Mpa (2000 KPa) como o limite crítico ao desenvolvimento radicular das plantas.

Com a demanda de gerenciamento das propriedades rurais através de ferramentas de AP, surgiu então uma nova forma de gestão da propriedade, que é a avaliação de RP em zonas de manejo, visando entender os dados coletados a campo nos diferentes ambientes de produção. Tendo em vista a importância deste tema, o estudo teve por objetivo avaliar a amostragem da resistência do solo a penetração baseada em grade comparada a amostragem em ambiente de produção.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para esse estudo, foram analisadas nove áreas. Todas localizadas na região norte do estado do Rio Grande do Sul (RS), abrangendo uma área de 766 ha com total de 840 pontos. Todas as áreas estudadas apresentam o SPD consolidado, emprego de rotação de culturas e histórico de manejo com a adoção de práticas de AP.

A amostragem da resistência do solo a penetração foi realizada em malha amostral regular de 100 x 100 m, com quatro repetições em cada ponto amostral, totalizando para as nove áreas 3360 leituras. Apenas na área localizada em Boa vista das Missões a malha foi gerada de 50 x 50 m (Tabela 1). As malhas amostrais foram geradas por meio do programa CR Campeiro 7.35 (GIOTTO, 2019), após a obtenção dos contornos das nove áreas, sendo adquirido através do projeto construindo e desafiando a produtividade - ConnectFarm/CDP, pelo método de caminhamento dos extremos da área com uso de GPS.

Tabela 1 – Tamanho em hectares das diferentes áreas estudadas, sua respectiva localização e número de pontos amostrais obtidos por área.

Área	Munícipio	Tamanho da Área (ha)	Número de pontos amostrais
A	Quatro Irmãos	56	56
B	Coxilha	59	59
C	Coxilha	68	68
D	Boa Vista das Missões	73	147
E	São Miguel das Missões	79	79
F	Cruz Alta	84	84
G	São Miguel das Missões	99	99
H	Pejuçara	110	110
I	Condor	138	138

Fonte: Autores.

Para a definição dos ambientes de produção foram utilizados a sobreposição de dados históricos de produtividade. Os algoritmos para geração desses ambientes fazem parte da inteligência da empresa ConectFARM sendo disponibilizado já gerados para fins desse estudo. Em cada área foram definidos três ambientes (zona de alta, zona de média e zona de baixa produtividade) e, definidos pontos para as avaliações como apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Tamanho em hectares das diferentes áreas estudadas, sua respectiva localização e número de pontos em cada zona de manejo, zona de baixa (ZB), zona de média (ZM) e zona de alta (ZA).

Área	Município	Tamanho da Área (há)	Números de pontos ZB	Números de pontos ZM	Números de pontos ZA
A	Quatro Irmãos	56	2	2	2
B	Coxilha	59	2	2	2
C	Coxilha	68	3	4	4
D	Boa Vista das M.	73	2	3	3
E	São Miguel das M.	79	3	3	2
F	Cruz Alta	84	3	3	3
G	São Miguel das M.	99	4	3	3
H	Pejuçara	110	3	3	2
I	Condor	138	4	5	5

Fonte: Autores.

A avaliação de RP foi realizada com um penetrômetro digital automático da marca Falker modelo PenetroLog PLG1020®, utilizando-se uma haste com 0,60 m de comprimento, cone com diâmetro de 12,81 cm e ângulo de cone de 25,00°. O equipamento é acionado por um sistema hidráulico que está acoplado no quadriciclo que realiza a leitura em velocidade constante a fim de evitar possíveis erros amostrais. O equipamento possui interface no painel para armazenagem das medições (podem ser visualizadas instantaneamente) para transferência de dados por cartão de memória ou USB.

Esse aparelho é um medidor eletrônico que avalia a resistência física que o solo exerce mediante a penetração de uma haste metálica rígida, essa avaliação foi realizada na profundidade de 0 a 0,60 m, sendo quatro amostras por ponto amostral. Os valores de RP foram obtidos em kilopascal (kPa) a cada centímetro de profundidade. O solo, no momento das leituras, encontrava-se com umidade em capacidade de campo, a fim de evitar variações nas diferentes avaliações.

Após a transferência das leituras de RP do equipamento para o computador, foram gerados os gráficos em grade através da média dos pontos, de zona de baixa, zona de média e zona de alta com a média dos pontos de cada zona das nove áreas do projeto. Também foi coletado solo nas camadas 0 – 0,15 m e 0,15 -0,30 m para

avaliação do teor de argila. As amostras foram encaminhas para o Laboratório de Solos da UFRGS.

3 RESULTADOS E DISCUSÕES

Os resultados quanto ao teor de argila assumem variabilidade espacial e vertical na maioria das áreas estudadas, exceto as áreas C e E, devido às suas texturas de solo se demonstrarem extremamente argilosa, situando-se apenas no intervalo de 60 a 100% em área total e nas diferentes camadas. Em estudos como de Ferreira, Fernandes e Curi (1999) mostram que as propriedades físicas associadas à estrutura (diâmetro dos agregados) foram marcantemente influenciadas pela composição mineralógica da fração argila.

É importante mencionar que os mapas temáticos de argila das áreas A, B, D, F, G, H e I, mesmo apresentando variabilidade espacial e vertical quanto aos teores de argila não influenciaram nas avaliações de RP do solo por apresentarem semelhante e elevados teores de argila. Todas as áreas do presente estudo as avaliações de RP foram realizadas em capacidade de campo do solo, evitando que a umidade do solo possa influenciar nos dados coletados. Pois em estudos como de Santi et al. (2014b) as avaliações de RP do solo apresentaram variabilidade temporal, devido os teores de umidade no solo durante as avaliações.

Os mapas dos ambientes de produção (figura 1) mostra a variabilidade espacial das 9 áreas do projeto, onde pode-se identificar a zona de baixa ocorrendo normalmente nas extremidades da área enquanto as zonas de média e alta estão direcionadas mais ao centro.

As nove áreas apresentaram pouca diferença quando se compara a leitura média de RP na camada de 0,15 – 0,20 m com a camada de 0,20 – 0,25 m, muito provavelmente que esse fato seja explicado por serem as camadas com maiores leituras de RP, apresentando maior e semelhante nível de compactação superficial, o que resultou em pequenas variações entre as camadas e em algumas áreas (especialmente a B, E e H) a variabilidade espacial foi baixa.

Outro aspecto observado nos mapas temáticos é a presença de pontos específicos com valores de resistência à penetração (RP) mais elevados em comparação a outras regiões da área. Conforme descrito por Silva, Reichert e Reinert (2004), esses locais tendem a ser mais suscetíveis à compactação em função das pressões recorrentes, resultantes principalmente de manobras e do maior tráfego de máquinas agrícolas. Geralmente, tais áreas concentram-se nas extremidades da lavoura. Apenas a área G tem região situada no intervalo de 5000 a 6000 kPa e 4000 a 5000 kPa na camada de 0,15 - 0,20 m e 0,20 - 0,25 m, cujo valores estão acima do limite crítico ao desenvolvimento radicular em todas as literaturas revisadas. As demais áreas do projeto estão no intervalo de 3000 a 4000 kPa ou abaixo deste valor em ambas as camadas.

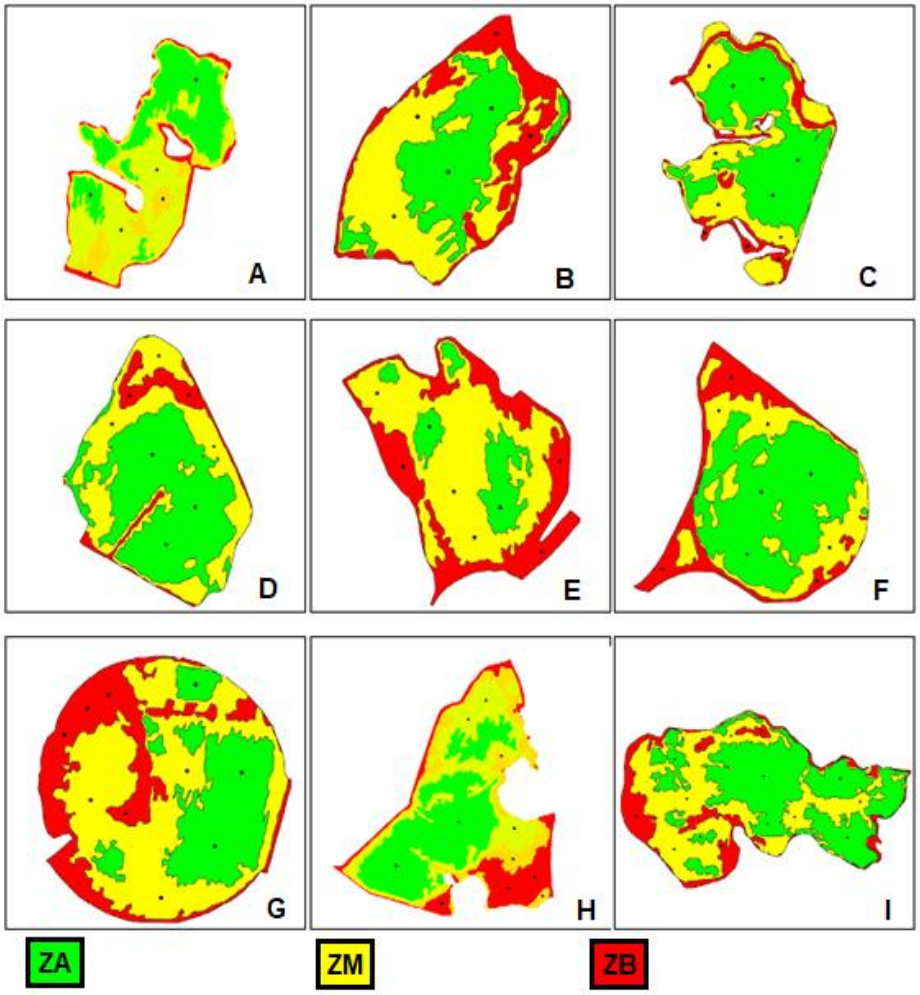
Os dados apresentados demonstram a variação da resistência do solo a penetração no perfil estudado (0,60 m), onde pode-se dar ênfase na camada de 0,15 a 0,20 m e 0,20 – 0,25 m pôr assumir maiores valores de leituras na maioria das áreas. Avaliações de resistência do solo a penetração no estudo de Assis e Lanças (2005), indicam em áreas de plantio direto de longa duração, a camada avaliada com maior

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque (RS) · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

nível de compactação foi nas profundidades de 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 30 m, evidenciando possíveis restrições à penetração de raízes.

Figura 1 – Ambientes de produção das nove áreas estudadas.



Legenda: ZA) zona de alta; ZM) zona de média; ZB) zona de baixa.
Fonte: Projeto Construindo e Desafiando a Produtividade - ConnectFarm/CDP.

É interessante mencionar que todas as áreas, exceto a área E e G, apresentam valores inferiores ou próximo do limite crítico de 3500 kPa, proposto em estudo de Merotto Jr. e Mundstock (1999) ou de Girardello et al. (2014b) que definiu o valor crítico como de 3000 kPa. A área E possui valores que ultrapassam os 3000 kPa nas camadas inferiores, 0,50 a 0,60 m, tanto nas amostragens por ambientes quanto nas amostragens por grade.

A área G ultrapassa os 3000 kPa nas amostragens em grade, zona de baixa e zona de média, em camadas inferiores do solo, inclusive na zona de baixa chega próximo a 5000 kPa, cujos valores estão acima do limite crítico ao desenvolvimento radicular de todas as literaturas revisadas. Porém, as camadas superficiais destas áreas percebem-se baixo nível de compactação, estando abaixo ou próximo dos limites críticos ao desenvolvimento radicular das culturas. Também é importante mencionar que as camadas superficiais das áreas E e G quando se compara as amostragens realizada em grade com as de ambientes de produção, assume baixo nível de diferenciação.

ISBN 978-65-990392-6-3

Apenas a área G permitiu maior diferenciação, quando comparado as amostragens das zonas de baixa e alta com a de grade nas camadas inferiores a 0,40 m de profundidade. As diferentes camadas avaliadas nas demais áreas estudadas (A, B, C, D, F, H e I) demonstraram baixo nível de diferenciação tanto nas amostragens realizadas por grade quanto nas amostragens por ambientes de produção.

4 CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que a resistência do solo à penetração apresenta variabilidade espacial e vertical nas áreas avaliadas, com maior compactação entre 0,15 e 0,25 m de profundidade. Entretanto, a comparação entre as metodologias de amostragem em grade e por ambientes de produção indicou baixo nível de diferenciação, com exceção de situações pontuais, como observado na área G.

Dessa forma, ambas as formas de amostragem se mostraram eficazes para o diagnóstico da compactação, cabendo a escolha ao objetivo de manejo adotado. Ressalta-se ainda a importância do monitoramento contínuo e do uso de práticas conservacionistas, a fim de mitigar problemas de compactação e favorecer o desenvolvimento radicular das culturas.

5 REFERENCIAS

AMADO, T. J. C.; PONTELLI, C. B.; SANTI, A. L.; VIANA, J. H. M.; SULZBACH, L. A. S. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1101-1110, 2007.

ASSIS, R. L. D.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférrico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 515-522, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000400004. Acesso 19 out. 2019.

CALONEGO, J. C.; BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C. Intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p. 2183-2190, 2011.

CHERUBIN, M. R.; SANTI, A. L.; EITELWEIN, M. T.; AMADO, T. J. C.; SIMON, D. H.; DAMIAN, J. M. Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 2, p. 168-177, 2015. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/pab/v50n2/0100-204X-pab-50-02-00168.pdf. Acesso em 03 out. 2019.

CHERUBIN, M. R.; SANTI, A. L.; PIAS, O. H. C.; EITELWEIN, M. T.; BASSO, C. J.; FLORA, L. P. D.; MELO, J. D. Amostragem de solo na agricultura de precisão. In: SANTI, A. L.; SEBEM, E.; GIOTTO, E.; AMADO, T. J. C. (orgs.). **Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: CESPOL, 2016. p. 79-98.

COLAÇO, A. F.; MOLIN, J. P. Amostragem georreferenciada. **Agricultura de Precisão Boletim Técnico**, Piracicaba, n. 2, p. 1-5, out. 2014. Disponível em:

https://www.agriculturadeprecisao.org.br/wp-content/uploads/2020/04/Boletim-T%C3%A9cnico-Amostragem_out_2014.pdf. Acesso em: 05 nov. 2019.

CORREIA, N. M.; DURIGAN, J. C. Culturas de cobertura e sua influência na fertilidade do solo sob sistema plantio direto (SPD). **Bioscience Journal**. v. 24, n. 4, p. 20-31, 2008. Disponível em: http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/6947. Acesso em: 10 out. 2019.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KÖGEL-KNABNER, I. Carbon and nitrogen stocks in phisical fractions of a subtropica acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation. **Plant and Soil**, v. 268, p. 319-328, 2005. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-004-0330-4. Acesso em: 10 out. 2019.

EITELWEIN, M. T.; SANTI, A. L.; GIOTTO, E.; DAMIAN, J. M.; CHERUBIN, M. R.; CORASSA, G. M.; BASSO, C. J.; FLORA, L. P. D. **Mapeamento da produtividade de grãos e utilização dos mapas**. Santa Maria – RS: CESPOL, 2016.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 515-524, 1999. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v23n3/04.pdf. Acesso em: 19 out. 2019.

FLORA, D. P. D. **Distribuição espacial de massa seca de plantas de cobertura de outono/inverno**. 2019. 89 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/18723/DIS_PPGAAA_2019_DELLA_FLORA_DIANDRA.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 12 set. 2019.

FREIRE, F. M.; VASCONCELLOS, C. A.; FRANÇA, G. E. Manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 49-56, jan./fev. 2001. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/485006. Acesso em: 02 set. 2019.

GIOTTO, E. **CR Campeiro versão 7.35**. 2019. Disponível em: http://www.crcampeiro.net/. Acesso em: 02 nov. 2019.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T. G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1234-1244, 2014a.

GIRARDELLO, V.; AMADO, T.; ERTEL, C.; GARLET, L. Benefícios do tráfego controlado de máquinas. **A Granja**, n. 785, p. 34-37, 2014b.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, N. 2, p. 169-177, 2005.

LUCHIARI JUNIOR, A.; SILVA, A. S.; BUSCHINELLI, C. C. A.; HERMES, L. C.; CARVALHO, J. R. P.; SHANAHAN, J.; SCHEPERS, J. S. Agricultura de precisão e meio ambiente. In: MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A. (eds.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. p. 19-35. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/164652/1/2005CL-032.pdf. Acesso em: 02 nov. 2019.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A.; CARMO, C. A. F. S.; MEIRELLES, M.S. P.; MANZATTO, C. V. Estudo de caso em agricultura de precisão: manejo de lavoura de soja na região de Campos Gerais, PR. In: MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A. (eds.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. p. 93-112. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/175687/1/Agricultura-de-precisao-para-o-manejo-da-fertilidade-do-solo-em-sistema-plantio-direto-2004.pdf. Acesso em: 02 set. 2019.

MANTOVANI, E. C.; COELHO, A. M.; MATOSO, M. J. Agricultura de precisão. **Agroanalysis**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, p. E12-13, abr. 2005.

MEROTTO JR., A.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p.197-202, 1999. Disponível em: https://pdfs.semanticscholar.org/35c6/5149d46fbf5ff05d6f0808e93e776c5f1790.pdf. Acesso em: 25 out. 2019.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, v. 22, n. 1, p. 83-92, 2002.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R.; LUZ, F. B. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil And Tillage Research**, v. 155, p. 351-362, 2016.

OLIVEIRA, J. F.; MARCHÃO, R. L.; CORAZZA, E. J.; MALAQUIAS, J. V.; HURTADO, S. M. C.; VILELA, M. F.; GUIMARÃES, M. F. Qualidade física do solo em zonas homogêneas para adoção do manejo sítio-específico. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, Á. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (eds.). **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília: Embrapa, 2014. p. 231-238.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; FERREIRA, M. M.; DIAS JUNIOR, M. S.; GOMES, A. S.; TURATTI, A. L. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira Ciência**

Solo, v. 25, n. 3, p. 521-529, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000300001. Acesso em: 20 set. 2019.

PIERCE, F. J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Adv. Agronomy**, v. 67, p.1-85, 1999.

RESENDE, A. V.; FONTOURA, S. M. V.; BORGHI, E.; SANTOS, F. C.; KAPPES, C.; MOREIRA, S. G.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; BORIN, A. L. D. C. Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 156, p. 1-19, dez. 2016. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1070008/1/Solosfertilidade1.pdf. Acesso em: 17 out. 2019.

SÁ, J. C. M.; SÉGUY, L.; TIVET, F.; LAL, R.; BOUZIBAC, S.; BORSZOWSKEI, P. R.; BRIEDIS, C.; SANTOS, J. B.; HARTMAN, D. C.; BERTOLONI, C. G.; ROSA, J.; FRIEDRICH, T. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation e Development**, v. 26, p. 531-543, 2015. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.2218. Acesso em: 19 out. 2019.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; EITELWEIN, M. T.; CHERUBIN, M. R.; SILVA, R. F.; DA ROS, C. O. Definição de zonas de produtividade em áreas manejadas com agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 3, p. 510-515, 2013. Disponível em: http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v8i3a2489. Acesso em: 07 out. 2019.

SANTI, A. L.; CORASSA, G. M.; AMADO, T. J. C.; KOPPE, E.; BERTOLLO, A. M.; MENEGOL, D. R.; SILVA, D. A. A.; SILVA, V. R. Plantas de cobertura de inverno e a variação espacial e temporal da resistência do solo a penetração. **Revista Plantio Direto**, v. 140, p. 10-20, 2014a.

SANTI, A. L.; CORASSA, G. M.; GAVIRAGHI, R.; BISOGNIN, M. B.; BASSO, C. J.; FLORA, L. P. D.; CASTRO, D. M.; FLORA, D. P. D. Multifuncionalidade de biomassas de cobertura do solo e agricultura de precisão. **Revista Plantio Direto**, v. 137/138, p. 16-23, 2014. Disponível em: https://www.plantiodireto.com.br/storage/files/137-138/3.pdf.

SANTI, A. L.; DAMIAN, J. M.; FLORA, D. P. D.; BRIGNONI, E.; FORNARI, E. Z.; SOUZA, F. M.; GERLACH, L. F.; BARCELLOS, P. A.; JUNG, C. Variabilidade dos cultivos de inverno e os impactos nos cultivos de verão. **Revista Plantio Direto**, v. 155, p. 29-35, 2017. Disponível em: https://www.plantiodireto.com.br/storage/files/155/6.pdf.

SCHWALBERT, R. A.; CORASSA, G. M.; AMADO, T. J. C. Definição de zonas de manejo utilizando “multi-layers” e sensoriamento “on-the-go”: definições e uso. In: SANTI, A. L.; SEBEM, E.; GIOTTO, E.; AMADO, T. J. C. (orgs.). **Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: CESPOL, 2016. p. 233-249.

SECCO, D.; REINERT, D.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, v. 39, n. 1, p. 58-64, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0103-84782009000100010. Acesso em: 25 set. 2019.

SILVA, A. P.; BABUJIA, L. C.; FRANCHINI, J. C.; RALISCH, R.; HUNGRIA, M.; GUIMARÃES, M. F. Soil structure and its influence on microbial biomass in different soil and crop management systems. **Soil and Tillage Research**, v. 142, p. 42-53, 2014. Disponível em: http://www.bashanfoundation.org/contributions/Hungria-M/2014.-Hungria-STR.pdf. Acesso em: 25 set. 2019.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 399-406, 2004. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/cr/v34n2/a10v34n2. Acesso em: 25 set. 2019.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. D.; MOREIRA, J. A. A. **Atributos físico-hídricos do solo sob plantio direto**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 39 p. (Documentos, 191). Disponível em: https://www.docsity.com/pt/atributos-fisicos-e-hidricos-do-solo-sob-plantio-direto/4716781/. Acesso em: 05 nov. 2019.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da. Atributos físico-hídricos de um latossolo vermelho submetido a diferentes preparos e rotações de culturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33., 2004, São Pedro. **A inserção da engenharia agrícola em projetos nacionais**. Campinas: Unicamp: Embrapa Informática Agropecuária, 2004. p. 1-4. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/207475/1/cbea-2004.pdf. Acesso em: 20 set. 2019.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Compressibility of Oxisol Aggregates under no-till in response to soil water potential. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1525-1533, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600002. Acesso em: 12 set. 2019.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER JR., J. J. Soil strength-root penetration relations for medium-to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, n. 1, p. 18-22, 1966. Disponível em: https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1966/07000/Soil_Strength_Root_Penetration_Relations_for.2.aspx. Acesso em: 15 out. 2019.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 333-339, 1996.

VALENTE, J.; SANZ, D.; BARRIENTOS, A.; DEL CERRO, J.; RIBEIRO, A.; ROSSI, C. An air-ground wireless sensor network for crop monitoring. **Sensors**, v. 11, p. 6088-6108, 2011. Disponível em: https://cyberleninka.org/article/n/384776.pdf. Acesso em: 17 out. 2019.

CAPÍTULO 10

EFEITO DE SISTEMAS DE MANEJO DE INVERNO NA DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

Effect of Winter Management Systems on the Vertical Distribution of Soil Chemical Attributes

Renan da Rosa[1]; Antônio Luis Santi[1]; Diego Armando Amaro da Silva[1]; Maurício Guilherme Stein Vian[1]; Amanda Trentin Moro [1]; Willian José Junges[1]; Amanda Fornari[1]; Julio Gustavo Buchholz[1]

[1] Universidade federal de Santa Maria – Campus de Frederico Westphalen – Departamento de Ciências Agrárias, BR386 KM Linha 7 de Setembro, 98400000, Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul, Brasil, renandarosa1@gmail.com, santi_pratica@yahoo.com.br, damaro.agro@gmail.com, _mauricio.vian@acad.ufsm.br, _amanda.moro@acad.ufsm.br, willian.junges@acad.ufsm.br, amanda.fornari@acad.ufsm.br, julio.buchholz@acad.ufsm.br.

RESUMO

A variabilidade espacial dos atributos químicos do solo afeta diretamente a fertilidade e a eficiência do manejo agrícola, sobretudo em sistemas de plantio direto. Assim este estudo, realizado no município de Frederico Westphalen – RS, avaliou dez sistemas de manejo de inverno - pousio invernal (PO), aveia preta (Ap), aveia branca (AB), azevém (AZ), nabo forrageiro (NF), ervilhaca (E), tremoço branco (TB) e consórcios de ApNFE, ApNF e ApE - em cinco profundidades de coleta (0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20 e 0,20-0,25 m), com dez repetições por sistema em cada profundidade. Foram determinados pHágua, acidez trocável e potencial, matéria orgânica, P, K, Ca, Mg, relação Ca/Mg, CTC, saturação por bases e por Al e os dados submetidos à análise avaliando a dispersão e a normalidade. O objetivo foi verificar os efeitos de três anos de manejo de inverno na distribuição espacial dos atributos químicos do solo sob plantio direto com agricultura de precisão no sul do Brasil. O nabo forrageiro aumentou o P nas camadas superficiais, alguns manejos elevaram o K, e monoculturas de gramíneas, mesmo com altos teores de K e matéria orgânica, reduziram outros atributos, evidenciando contrastes entre os sistemas avaliados.

Palavras-chave: Fertilidade do solo. Plantas de cobertura. Agricultura de precisão.

ABSTRACT

The spatial variability of soil chemical attributes directly affects fertility and the efficiency of agricultural management, especially in no-tillage systems. Thus, this study, conducted in the municipality of Frederico Westphalen – RS, evaluated ten winter management systems – winter fallow (PO), black oat (Ap), white oat (AB), ryegrass (AZ), forage radish (NF), vetch (E), white lupin (TB), and the consortia ApNFE, ApNF, and ApE – at five sampling depths (0.00-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.15; 0.15-0.20; and 0.20-0.25 m), with ten replications per system at each depth. The following attributes were determined: pH in water, exchangeable and potential acidity, organic matter, P, K, Ca, Mg, Ca/Mg ratio, CEC, base saturation, and Al saturation, and the data were subjected to analysis assessing dispersion and normality. The objective was to verify the effects of three years of winter management on the spatial distribution of soil chemical attributes under no-tillage with precision agriculture in southern Brazil. Forage radish increased

P in the surface layers, some management systems raised K, and grass monocultures, even with high levels of K and organic matter, reduced other attributes, highlighting contrasts among the evaluated systems.

Keywords: Soil fertility. Cover crops. Precision agriculture.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, há uma tendência mundial no setor agrícola para gerar informações sobre as causas da variabilidade espacial das propriedades do solo, a fim de facilitar a tomada de decisão com as diferentes ferramentas de informação geográfica ou com agricultura de precisão, além de compreender como a distribuição espacial dos atributos do solo é importante no estabelecimento de práticas de manejo adequadas, não só para o aumento da produção agrícola, mas também para a redução de danos ambientais (LAURENTII et al., 2024).

O manejo pode conduzir, gradualmente, à melhoria da qualidade do solo agrícola, expressa por propriedades que indicam elevado potencial produtivo Lemago et al., (2023), ou, se inadequado, ao processo de degradação do solo, refletido por baixas produtividades Vezzani (2001). Por isso, avaliar os impactos dos diferentes sistemas de manejo é fundamental para garantir a sustentabilidade das áreas agrícolas.

Atualmente, buscam-se sistemas de manejo do solo que sejam sustentáveis, além de apresentarem retorno econômico, ecológico e social Molin et al., (2015). A degradação rápida dos solos sob exploração agrícola, especialmente em países tropicais em desenvolvimento, reforça a necessidade de atenção à qualidade do solo e à sustentabilidade da exploração agrícola (MONTEIRO e PONCIANI 2012).

Os recentes aumentos nos preços dos insumos agrícolas levaram os agricultores a priorizar práticas de menor custo que mantenham altas produtividades Molin et al., (2015), como o uso de plantas de cobertura para manejo da fertilidade do solo, que podem substituir ou complementar a fertilização química Melo et al., (2011). A decomposição dos resíduos culturais favorece os atributos químicos e físicos do solo, incrementando os teores de matéria orgânica do solo (MOS) em comparação com monoculturas anuais, promovendo efeitos positivos na fertilidade (SILVA et al., 2013).

A adoção de métodos que promovem menor revolvimento do solo, como o sistema de plantio direto (SPD), e a inclusão de leguminosas e gramíneas com alta biomassa nitrogenada resultam em melhoria das características químicas do solo, inicialmente nas camadas superficiais Mannigel et al., (2009). A maior parte dos nutrientes das plantas de cobertura encontra-se nos resíduos vegetais, exercendo função estrutural ou de reserva, com parte disponível em curto prazo, contribuindo para a produtividade das culturas subsequentes (SOUZA e MELO, 2000).

Estudos mostram que os resíduos de plantas de cobertura beneficiam os atributos químicos e físicos do solo Bertol et al., (1998); Torres et al., (2008) e auxiliam no controle de plantas daninhas Cavalcante et al., (2012). O SPD sobre a palhada requer espécies que produzam biomassa suficiente e sejam persistentes, protegendo o solo e disponibilizando nutrientes, especialmente em períodos de escassez hídrica, o que aumenta a produtividade das culturas subsequentes (BRESSAN et al., 2013).

O efeito da cobertura vegetal sobre atributos químicos do solo está relacionado à espécie utilizada, à classe do solo, ao clima e ao manejo da planta de cobertura Andreola et al., (2015). É fundamental utilizar espécies que mobilizem os nutrientes na camada agricultável, retendo-os na fitomassa e devolvendo-os ao solo durante a decomposição Denardin e Kochhann, (1993), mesmo que seja necessário avaliar a real contribuição dessas espécies e manejos para manutenção ou elevação da fertilidade do solo, melhorando a produtividade das culturas comerciais.

A prática da utilização de sistemas de manejo de inverno em consórcio é capaz de promover em ambientes com histórico de baixa produtividade, melhorias positivas mais acentuadas na qualidade química do solo que sistemas de manejo de inverno em monocultivos ou vegetação espontânea (pousio invernal).

Dessa forma, há a necessidade de se avaliar as opções de sistemas de manejo de inverno e sua influência nos atributos químicos do solo, bem como, identificar quais são as camadas do solo mais afetadas por cada sistema a médio prazo. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi determinar a influência de sistemas de manejo de inverno, após três anos de cultivo, na distribuição espacial horizontal e vertical dos atributos químicos do solo, em área manejada sob SPD com ferramentas de agricultura de precisão, no sul do Brasil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O trabalho foi conduzido na área experimental da Universidade Federal de Santa Maria campus Frederico Westphalen, RS, localizada nas coordenadas 27°23'24.33" S e 53°25'39.58" O, com altitude de 483 m. O clima do local é subtropical de primavera úmida (STPU) com temperatura média anual de 18,1ºC, e precipitação pluvial anual média de 1.919 mm bem distribuídos ao longo do ano (MALUF, 2000). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (SANTOS, et al., 2013), com textura argilosa (66%) e relevo suave ondulado.

2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados

O presente trabalho avaliou diferentes sistemas de manejo de inverno após três anos de cultivo dos mesmos, com dez sistemas de manejo de inverno e cinco profundidades de coleta, com dez repetições por sistema em cada profundidade. Os sistemas de manejo de inverno foram implantados, pelo terceiro ano consecutivo, sendo: aveia preta (*Avena strigosa* S. – Ap), aveia branca (*Avena sativa* L. - AB), azevém (*Lolium multiflorum* L. - AZ), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L. - NF), ervilhaca (*Vicia sativa* L. - E), aveia preta + ervilhaca + nabo forrageiro (ApNFE), aveia preta + nabo forrageiro (ApNF), aveia preta + ervilhaca (ApE), tremoço branco (*Lupinus albus* L. - TB) e pousio invernal (vegetação espontânea - PO). O histórico de cultivos e as adubações na área experimental estão especificadas na Tabela 1.

Foram coletadas amostras das plantas a partir de uma área de 0,5 x 0,5 m por parcela, sendo secadas em estufa (65 ºC) até massa constante, para estimar a matéria seca (MS) produzida por cada sistema de manejo de inverno.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 1 – Histórico dos cultivos, práticas de adubação e correção realizadas na área experimental. Frederico Westphalen - RS.

Período	Cultura	Adubação (NPK)	Quantidade (kg ha^{-1})	Forma de aplicação
Inverno	Plantas de cobertura	Calagem **	3500* **	Lanço/Incorporado **
Verão	Feijão	09-25-15 45-00-00	300 250	Linha Lanço
	Milho safrinha	09-25-15 45-00-00	350 250	Linha Lanço
Inverno	Plantas de cobertura	**	**	**
Verão	Feijão	09-25-15 45-00-00	300 250	Linha Lanço
Inverno	Plantas de cobertura	**	**	**

Legenda:(*) Calcário dolomítico PRNT 85%; (**) Sem Adubação (NPK).
Fonte: Diego Armando Amaro da Silva (2024)

As amostragens de solo nas áreas estudadas foram realizadas 40 dias após a dessecação das plantas de cobertura do solo, sendo retiradas amostras deformadas nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20 e 0,20-0,25 m. Posteriormente, as amostras foram encaminhadas para análises químicas ao Laboratório de Química do Solo da Universidade Federal de Santa Maria - Campus Frederico Wespthalen, sendo determinados os teores de matéria orgânica do solo (MOS), $pH_{água}$ (1:1), teores disponíveis de P e K (Mehlich^{-1}), Ca e Mg (KCl 1 mol L^{-1}), acidez trocável (Al) e potencial (H+Al), e calculados a relação Ca/Mg, capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m), todas conforme metodologias descritas em Tedesco et al. (1995) e recomendadas pela (CQFS- RS/SC, 2016).

Os dados foram submetidos à análise exploratória (estatística descritiva), objetivando verificar a posição e dispersão dos dados, e sendo verificada a existência de tendência central (normalidade) dos dados por meio do teste Shapiro-Wilk (W) a $p < 0,05$. Com base nos valores de coeficiente de variação (CV), a dispersão dos dados foi classificada em: baixa (CV <15%), moderada (15%< CV <35%), e alta variabilidade (CV >35%). Foi efetuada a análise da variância e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott ($p<0,05$), além da correlação simples de Pearson entre os atributos analisados, classificados como: fraca (0,1< r <0,3), moderada (0,4< r <06), forte (r >0,7), e ideal (r =1). Para as análises dos dados foi utilizado o programa estatístico ASSISTAT 7.7.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise descritiva exploratória dos atributos químicos do solo possibilitou verificar que a área experimental apresenta $pH_{água}$ alto, CTC e saturação por bases alta, teores de MOS médios e baixa saturação por Al (Tabela 2) (CQFS-RS/SC, 2016), não restringindo o desenvolvimento normal das plantas cultivadas sob SPD (CHERUBIN, 2013).

Tabela 2 – Estatística descritiva dos atributos químicos do solo em dez sistemas de manejo de inverno em cinco profundidades. Frederico Westphalen - RS. (continua)

Variável[2]	Profundidade de amostragem (m)	Parâmetros Estatísticos[1]								
		n	Valores			DP	Coeficientes			Teste W[3]
			Mín	Méd	Máx		CV	Cs	Ck	
MOS (g kg^{-1})	0,00 - 0,05	100	17,1	30,0	41,0	2,7	12,27	-0,33	2,22	0,96*
	0,05 - 0,10	100	18,4	25,1	32,1	1,8	9,95	0,39	1,18	0,97*
	0,10 - 0,15	100	16,1	22,2	29,4	2,3	10,56	0,22	0,42	0,99^{ns}
	0,15 - 0,20	100	13,6	19,5	27,6	2,6	13,52	0,39	0,54	0,98^{ns}
	0,20 - 0,25	100	12,7	18,0	37,6	3,2	17,90	2,39	12,87	0,84*
$pH_{água}$	0,00 - 0,05	100	5,57	6,76	7,57	0,44	6,52	-0,68	-0,13	0,95*
	0,05 - 0,10	100	5,23	6,75	7,65	0,52	7,72	-0,93	0,51	0,93*
	0,10 - 0,15	100	5,40	6,86	7,66	0,50	7,29	-1,03	0,56	0,91*
	0,15 - 0,20	100	5,31	6,73	7,47	0,53	7,93	-0,83	-0,02	0,93*
	0,20 - 0,25	100	5,34	6,64	7,76	0,56	8,44	-0,50	-0,40	0,96*
P (mg dm^{-3})	0,00 - 0,05	100	2,0	16,8	40,4	7,9	47,10	1,02	0,70	0,92*
	0,05 - 0,10	100	1,1	10,5	36,6	5,8	55,61	1,85	4,81	0,85*
	0,10 - 0,15	100	1,4	5,2	17,7	3,3	65,14	1,64	2,73	0,84*
	0,15 - 0,20	100	0,8	2,6	14,6	1,8	69,25	3,59	18,94	0,68*
	0,20 - 0,25	100	0,9	2,1	17,3	1,9	91,92	6,28	46,57	0,41*
K (mg dm^{-3})	0,00 - 0,05	100	36	284	520	82	28,82	0,12	0,41	0,99^{ns}
	0,05 - 0,10	100	44	162	333	62	38,62	0,48	-0,11	0,97*
	0,10 - 0,15	100	31	112	282	58	51,55	0,88	0,22	0,93*
	0,15 - 0,20	100	25	78	231	47	60,65	1,19	0,84	0,88*
	0,20 - 0,25	100	17	61	353	47	77,18	3,19	15,19	0,71*
Ca ($cmol_c$ dm^{-3})	0,00 - 0,05	100	5,7	9,4	12,2	1,4	15,10	-0,59	-0,32	0,96*
	0,05 - 0,10	100	4,4	8,8	12,5	1,9	21,13	-0,60	-0,46	0,95*
	0,10 - 0,15	100	3,5	7,9	11,1	1,9	23,81	-0,49	-0,51	0,96*
	0,15 - 0,20	100	3,1	6,7	10,0	1,6	23,74	-0,49	-0,49	0,96*
	0,20 - 0,25	100	2,4	5,9	8,4	1,4	23,73	-0,33	-0,47	0,98^{ns}
Mg ($cmol_c$ dm^{-3})	0,00 - 0,05	100	3,6	5,4	7,5	0,7	12,22	0,25	1,53	0,96*
	0,05 - 0,10	100	2,9	5,1	6,9	0,9	17,42	-0,49	-0,18	0,96*
	0,10 - 0,15	100	2,5	4,7	7,4	0,8	17,60	-0,47	0,88	0,95*
	0,15 - 0,20	100	2,1	4,1	5,9	0,8	18,86	-0,32	0,16	0,98^{ns}
	0,20 - 0,25	100	1,7	3,6	6,1	0,8	21,05	0,02	0,71	0,98^{ns}

Legenda: [(1)] Onde: n= número de observações (pontos amostrais); DP= desvio padrão; CV= coeficiente de variação (%); Cs= coeficiente de assimetria; Ck= coeficiente de curtose; [(2)] MOS= matéria orgânica do solo; CTC= capacidade de troca de cátions; V= saturação por bases; m= saturação por alumínio. [(3)] Teste W: Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: (*) significativo em níveis de p <0,05 e (^{ns}) não significativo. Quando for significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.

Fonte: Diego Armando Amaro da Silva (2024)

Tabela 2 – Estatística descritiva dos atributos químicos do solo em dez sistemas de manejo de inverno em cinco profundidades. Frederico Westphalen - RS. (Conclusão)

Variável [2]	Profundidade de amostragem (m)	Parâmetros Estatísticos[1]								
		n	Valores			DP	Coeficientes			Teste W[3]
			Mín	Méd	Máx		CV	Cs	Ck	
Al ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,00 - 0,05	100	0,00	0,01	0,13	0,02	230,98	4,38	26,67	0,48*
	0,05 - 0,10	100	0,00	0,01	0,16	0,03	227,87	3,11	10,71	0,51*
	0,10 - 0,15	100	0,00	0,01	0,12	0,03	212,60	2,42	5,29	0,54*
	0,15 - 0,20	100	0,00	0,02	0,27	0,06	212,88	3,08	9,61	0,52*
	0,20 - 0,25	100	0,00	0,04	0,41	0,08	204,73	2,57	6,21	0,55*
H+Al ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,00 - 0,05	100	1,2	1,8	4,1	0,6	31,29	1,62	2,39	0,81*
	0,05 - 0,10	100	1,1	1,9	4,4	0,8	40,15	1,45	1,16	0,78*
	0,10 - 0,15	100	1,2	1,9	3,9	0,7	35,86	1,36	0,89	0,82*
	0,15 - 0,20	100	1,2	2,0	3,9	0,6	31,96	1,23	0,64	0,87*
	0,20 - 0,25	100	1,4	2,1	3,8	0,6	29,48	1,09	-0,07	0,84*
CTC ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,00 - 0,05	100	12,8	17,3	21,0	1,7	9,87	-0,41	-0,11	0,98^{ns}
	0,05 - 0,10	100	10,9	16,1	19,4	2,1	13,14	-0,50	-0,77	0,95*
	0,10 - 0,15	100	9,3	14,7	19,4	2,2	15,24	-0,28	-0,54	0,98^{ns}
	0,15 - 0,20	100	8,1	12,9	17,8	2,1	16,52	-0,35	-0,32	0,97*
	0,20 - 0,25	100	7,4	11,8	19,4	2,2	19,10	0,26	0,41	0,98^{ns}
V (%)	0,00 - 0,05	100	74	89	94	4	5,02	-1,57	1,82	0,80*
	0,05 - 0,10	100	65	88	94	7	8,08	-1,51	1,33	0,76*
	0,10 - 0,15	100	65	87	93	7	8,61	-1,43	0,97	0,79*
	0,15 - 0,20	100	54	84	93	9	10,51	-1,50	1,46	0,80*
	0,20 - 0,25	100	53	82	92	10	12,02	-1,26	0,46	0,82*
m (%)	0,00 - 0,05	100	0,0	0,0	0,8	0,1	218,95	3,39	15,20	0,53*
	0,05 - 0,10	100	0,0	0,1	1,9	0,3	253,24	3,55	14,03	0,46*
	0,10 - 0,15	100	0,0	0,2	1,6	0,4	230,86	2,72	6,95	0,50*
	0,15 - 0,20	100	0,0	0,4	5,9	1,0	253,61	3,60	13,45	0,45*
	0,20 - 0,25	100	0,0	0,7	7,9	1,6	231,67	2,85	7,88	0,49*
Relação Ca/Mg	0,00 - 0,05	100	1,09	1,76	2,24	0,20	11,42	-0,72	1,20	0,96*
	0,05 - 0,10	100	0,92	1,74	2,63	0,24	14,10	0,03	2,88	0,94*
	0,10 - 0,15	100	0,70	1,68	2,53	0,31	18,53	-0,64	2,13	0,93*
	0,15 - 0,20	100	0,90	1,65	2,28	0,27	16,14	-0,04	0,34	0,99^{ns}
	0,20 - 0,25	100	0,54	1,60	3,13	0,37	23,26	0,50	3,23	0,94*

Legenda: [(1)] Onde: n= número de observações (pontos amostrais); DP= desvio padrão; CV= coeficiente de variação (%); Cs= coeficiente de assimetria; Ck= coeficiente de curtose; [(2)] MOS= matéria orgânica do solo; CTC= capacidade de troca de cátions; V= saturação por bases; m= saturação por alumínio. [(3)] Teste W: Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: (*) significativo em níveis de p <0,05 e ([ns]) não significativo. Quando for significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.

Fonte: Diego Armando Amaro da Silva (2024)

Os nutrientes P, K, Ca e Mg apresentaram, em média, teores classificados como altos ou muito altos CQFS-RS/SC, (2016) até a profundidade de pelo menos 0,10 m, sendo constatada redução dos teores com aumento da profundidade amostrada (Tabelas 2 e 3) semelhante ao trabalho de Corassa et al., (2015), além do

ISBN 978-65-990392-6-3

aumento da variabilidade dos dados (CV). Este resultado é comum em áreas manejadas sob SPD, onde a aplicação de calcário contendo (Ca e Mg) e as adubações sequenciais em superfície (NPK) resultam na formação de um gradiente vertical de fertilidade (COSTA et al., 2016). No caso do P, o gradiente formado também é condicionado pela baixa mobilidade e concentração natural do nutriente em Latossolos (CORASSA et al., 2015). Segundo Dalla Nora e Amado (2014), esse gradiente de redução da qualidade química em SPD possui grande importância no RS por ser um dos estados brasileiros que registra maiores perdas de produção agrícola em decorrência de recorrentes estresses hídricos de variada intensidade.

Tabela 3 – Valores médios dos atributos químicos do solo em cinco profundidades sob dez sistemas de manejo de inverno. Frederico Westphalen - RS.

Atributos químicos do solo em profundidade												
Prof. (cm)	MOS	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V	m	Relação
	g kg^{-1}	H_2O	--- mg dm^{-3} ---		---------- cmol$_c$ dm^{-3} --------					----- % -----		Ca/Mg
0 - 5	30,0a[1]	6,76b	16,7ª	284ª	9,4ª	5,4ª	0,01c	1,8c	17,3ª	89ª	0,0c	1,76a
5 - 10	25,1b	6,75b	10,5b	162b	8,8b	5,1b	0,01c	1,9c	16,1b	88b	0,1c	1,74ª
10 –15	22,2c	6,86ª	5,2c	112c	7,9c	4,7c	0,01c	1,9c	14,7c	87c	0,2c	1,68b
15 - 20	19,4d	6,73b	2,7d	78d	6,7d	4,1d	0,02b	2,0b	12,9d	84d	0,4b	1,65b
20 - 25	18,0e	6,64b	2,1d	61e	5,9e	3,6e	0,04a	2,1a	11,8e	82e	0,7a	1,60b

Legenda: [(1)] Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott (p≤ 0,05).
Fonte: Diego Armando Amaro da Silva (2024)

Em relação a dispersão dos dados (Tabela 2), com base nos valores de CV, verificou-se que a MOS, $pH_{água}$ e saturação por bases, apresentaram baixa dispersão (CV <15%), concordando com estudos anteriores (AMADO et al., 2009; CHERUBIN et al., 2013). No entanto, apesar dos dados de $pH_{água}$ e saturação por bases apresentarem baixa dispersão, indicaram falta de normalidade nos dados, com assimetrias negativas (Cs <0) e distribuições platicúrticas (Ck <0) ou leptocúrticas (Ck >0), também observados por (DALCHIAVON et al. 2012; CHERUBIN et al., 2013). Os teores de P e K apresentaram alta dispersão dos dados (CV >35%), o mesmo que o constatado por Amado et al., (2009), com fortes assimetrias positivas para os valores de P, e para K nas camadas subsuperficiais, seguindo tendência de distribuições leptocúrticas.

Já para Ca e Mg, a dispersão dos dados foi moderada em todas as camadas, assim como observado por Bottega et al. (2013), apresentando normalidade apenas nas camadas inferiores, ocorrendo de forma semelhante na relação Ca/Mg e a CTC, porém com dispersões de fraca a moderada, com assimetrias predominantemente negativas fracas e distribuição platicúrtica para Ca e CTC, e assimetrias negativas/positivas fracas e distribuição leptocúrticas para Mg e relação Ca/Mg. Os teores de Al trocável e a saturação pelo mesmo (m) apresentaram altíssima variabilidade nos dados, com CV superiores a 200%, devido ao fato de haver presença ou ausência (muitos valores zero) do elemento em algumas camadas e sistemas,

ISBN 978-65-990392-6-3

dessa forma apresentando o desvio padrão (DP) maior que a média dos dados, sendo mais elevadas nas camadas inferiores, devido a menor saturação por bases em profundidade (Tabelas 2 e 3). De forma diferente, a acidez potencial (H+Al) apresentou dispersão moderada dos dados, não havendo normalidade destes.

Os sistemas de manejo de inverno contribuíram de forma diferente no teor de MOS na camada superficial do solo (0,00 - 0,05 m), destacando os maiores valores nos sistemas com Ap, AZ e o consórcio de Ap+E (Tabela 4), colaborando com os resultados encontrados por outros pesquisadores Leal et al., (2020), com os sistemas TB e PO apresentando os menores valores observados. Isto evidencia que a manutenção dos resíduos vegetais, principalmente de gramíneas com alta relação C/N, tende a aumentar a MOS, enquanto que resíduos culturais de menor relação C/N (leguminosas ou crucíferas) tendem a manter os teores ao longo do tempo, em níveis próximos aos do pousio invernal (PO). Além disso, a MOS apresentou forte correlação com os atributos P, K, CTC, assim como moderada para Ca e moderada-forte para Mg (Tabela 5), evidenciando sua importância como reserva de nutrientes no solo.

Tabela 4 – Valores dos atributos químicos analisados em dez sistemas de manejo de inverno em cinco profundidades, Frederico Westphalen - RS. (continua)

Atributos químicos do solo																															
---------- 0,00 - 0,05 m----------																															
Sistema de manejo	MOS		pH		P		K		Ca		Mg		Al		H+Al		CTC		V		m		Relação	
	g kg^{-1}		H_2O		---- mg dm^{-3} ----				---------- $cmol_c$ dm^{-3} ----------										---- % ----				Ca/Mg	
Ap	30,9	a[1]	6,41	b	10,7	b	299	a	7,8	c	5,1	b	0,0	ns	2,6	a	16,3	c	84	c	0,0	ns	1,6	b
AB	30,4	b	6,13	b	13,6	b	312	a	7,1	c	4,7	b	0,0		2,8	a	15,4	c	82	c	0,0		1,5	b
AZ	30,7	a	6,64	a	14,7	b	233	c	8,7	b	5,2	b	0,0		2,1	b	16,6	b	87	b	0,0		1,7	b
NF	29,6	b	6,89	a	20,6	a	270	b	9,6	a	5,0	b	0,0		1,7	c	17,0	b	90	a	0,0		1,9	a
E	30,4	b	6,94	a	18,1	a	297	b	9,7	a	5,4	a	0,0		1,6	c	17,4	a	91	a	0,0		1,8	a
ApNFE	30,1	b	6,72	a	14,1	b	317	a	10,1	a	5,4	a	0,0		1,6	c	17,9	a	91	a	0,0		1,9	a
ApNF	29,6	b	6,91	a	17,5	a	278	b	10,2	a	5,7	a	0,0		1,5	c	18,1	a	92	a	0,0		1,8	a
ApE	31,7	a	7,03	a	20,4	a	349	a	10,5	a	5,6	a	0,0		1,4	c	18,4	a	92	a	0,0		1,8	a
TB	28,2	b	7,01	a	19,1	a	249	b	9,8	a	5,7	a	0,0		1,4	c	17,5	a	92	a	0,0		1,7	b
P	28,1	b	6,95	a	18,2	a	242	c	10,5	a	5,8	a	0,0		1,4	c	18,3	a	92	a	0,0		1,8	a
---------- 0,05 - 0,10 m ----------																															
Ap	23,8	ns	6,07	c	7,8	b	152	b	6,1	d	4,2	b	0,1	a	3,3	a	14,0	d	76	c	0,6	ns	1,5	b
AB	25,0		6,05	c	9,3	b	168	b	6,2	d	4,0	b	0,1	a	3,0	a	13,6	d	78	c	0,5		1,6	b
AZ	25,0		6,63	b	11,7	b	155	b	7,8	c	4,4	b	0,0	b	2,2	b	14,8	c	85	b	0,1		1,7	b
NF	25,0		6,75	b	12,7	a	140	b	8,7	b	5,2	a	0,0	b	1,7	c	16,0	b	89	a	0,0		1,7	b
E	25,3		6,93	b	9,9	b	183	b	9,1	b	5,4	a	0,0	b	1,6	c	16,6	b	90	a	0,0		1,7	b
ApNFE	24,7		6,82	b	9,8	b	160	b	10,1	a	5,4	a	0,0	b	1,6	c	17,5	b	91	a	0,0		1,9	a
ApNF	26,1		7,10	a	9,7	b	154	b	9,7	a	5,7	a	0,0	b	1,5	c	17,3	b	91	a	0,0		1,7	b
ApE	25,0		7,16	a	12,5	b	197	a	10,2	a	5,3	a	0,0	b	1,5	c	17,5	b	91	a	0,0		1,9	a
TB	24,8		6,90	b	11,3	b	142	b	9,8	a	5,4	a	0,0	b	1,5	c	17,1	b	91	a	0,0		1,8	a
P	26,2		7,08	a	10,0	b	162	b	10,4	a	5,8	a	0,0	b	1,5	c	18,1	b	92	a	0,0		1,8	a

Legenda: [(1)] Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott (p≤ 0,05), e ([ns]) não significativo (p≤ 0,05).
Fonte: Diego Armando Amaro da Silva (2024)

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 4 – Valores dos atributos químicos analisados em dez sistemas de manejo de inverno em cinco profundidades, Frederico Westphalen - RS. (conclusão)

Sistema de manejo	MOS	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V	m	Relação
	g kg^{-1}	H_2O	mg dm^{-3}		cmol$_c$ dm^{-3}					%		Ca/Mg
Profundidade (m) 0,10 - 0,15 m												
Ap	21,1 ns	6,04 b	2,9 b	96 ns	5,4 c	3,8 b	0,1 a	3,1 a	12,5 c	75 c	0,7 a	1,5 b
AB	20,7	6,20 b	4,0 b	109	5,3 c	3,9 b	0,1 a	2,9 a	12,4 c	77 c	0,7 a	1,4 b
AZ	22,7	6,77 a	5,6 b	111	7,0 b	4,5 a	0,0 b	2,1 b	13,9 b	85 b	0,0 b	1,6 b
NF	22,4	7,08 a	8,0 a	108	8,4 a	5,1 a	0,0 b	1,6 c	15,4 a	90 a	0,0 b	1,6 b
E	22,2	7,10 a	6,2 b	138	8,3 a	5,1 a	0,0 b	1,6 c	15,4 a	90 a	0,0 b	1,6 b
ApNFE	22,1	6,95 a	4,3 b	115	9,1 a	4,9 a	0,0 b	1,6 c	15,9 a	90 a	0,0 b	1,9 a
ApNF	22,3	7,13 a	4,8 b	102	8,5 a	5,0 a	0,0 b	1,5 c	15,3 a	90 a	0,0 b	1,7 a
ApE	22,6	7,13 a	5,5 b	133	8,9 a	5,1 a	0,0 b	1,4 c	15,7 a	91 a	0,0 b	1,8 a
TB	22,3	7,11 a	4,8 b	95	9,3 a	4,9 a	0,0 b	1,5 c	15,9 a	91 a	0,0 b	1,9 a
P	23,1	7,10 a	5,5 b	114	9,1 a	5,0 a	0,0 b	1,5 c	15,9 a	91 a	0,0 b	1,8 a
0,15 - 0,20 m												
Ap	18,2 ns	6,04 b	2,0 ns	63 ns	4,6 c	2,9 b	0,1 a	3,0 a	10,7 c	72 c	1,5 a	1,6 ns
AB	18,7	5,93 b	1,4	58	5,0 c	3,1 b	0,1 a	3,1 a	11,3 c	73 c	2,1 a	1,6
AZ	18,5	6,82 a	2,2	72	6,3 b	4,1 a	0,0 b	2,1 b	12,7 b	83 b	0,2 b	1,6
NF	19,9	6,99 a	3,8	90	7,2 b	4,4 a	0,0 b	1,6 b	13,4 a	88 a	0,1 b	1,6
E	19,1	6,92 a	2,6	105	6,9 b	4,4 a	0,0 b	1,7 b	13,3 a	87 a	0,1 b	1,6
ApNFE	20,2	6,91 a	3,3	68	6,9 b	4,4 a	0,0 b	1,6 b	13,1 a	88 a	0,1 b	1,6
ApNF	19,4	6,99 a	2,3	70	7,2 b	4,3 a	0,0 b	1,6 b	13,3 a	88 a	0,1 b	1,6
ApE	20,1	6,92 a	3,5	104	8,2 a	4,4 a	0,0 b	1,6 b	14,5 a	89 a	0,1 b	1,8
TB	19,5	6,88 a	2,9	67	6,9 b	4,2 a	0,0 b	1,8 b	13,1 a	86 a	0,1 b	1,6
P	20,4	6,91 a	2,5	80	8,0 a	4,6 a	0,0 b	1,8 b	14,6 a	88 a	0,1 b	1,8
0,15 - 0,20 m												
Ap	16,5 b[1]	6,04 b	1,6 ns	42 ns	4,6 b	3,1 b	0,2 a	3,1 a	10,9 b	72 c	2,6 ns	1,6 ns
AB	16,1 b	5,83 b	1,5	48	4,6 b	3,0 b	0,2 a	3,0 a	10,7 b	72 c	2,8	1,8
AZ	16,0 b	6,57 a	1,5	47	5,3 b	3,6 a	0,1 b	2,3 b	11,3 b	80 b	0,8	1,6
NF	20,1 a	6,82 a	3,6	93	5,9 a	4,1 a	0,0 c	1,9 c	12,1 a	84 a	0,1	1,6
E	17,2 b	6,91 a	1,7	77	6,2 a	3,8 a	0,0 c	1,8 c	12,0 a	85 a	0,1	1,6
ApNFE	17,5 b	6,92 a	2,2	49	5,9 a	3,8 a	0,0 c	1,8 c	11,6 a	85 a	0,1	1,6
ApNF	17,8 b	6,95 a	1,9	57	6,5 a	3,9 a	0,0 c	1,8 c	12,3 a	85 a	0,1	1,7
ApE	18,8 a	6,81 a	3,1	79	6,7 a	3,8 a	0,0 c	1,9 c	12,6 a	85 a	0,1	1,8
TB	18,8 a	6,70 a	2,2	47	5,9 a	3,8 a	0,0 c	2,0 c	11,8 a	83 a	0,1	1,6
P	20,9 a	6,86 a	1,4	66	7,0 a	4,5 a	0,0 c	2,0 c	13,7 a	85 a	0,1	1,6

Legenda: [(1)] Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott (p≤ 0,05), e (ns) não significativo (p≤ 0,05).
Fonte: Diego Armando Amaro da Silva (2024)

Para os teores disponíveis de P no solo, notou-se um aumento nos valores na camada superficial quando utilizados sistemas como NF, E e ApE, sendo possível observar, que o primeiro sistema, promoveu aumento nas três primeiras camadas superficiais. Isto se deve provavelmente a ciclagem e a capacidade de absorção de P pelo NF, além da rapidez no processo de liberação no solo, devido a menor relação C/N e C/P, semelhante a Casali et al., (2011), acelerando a mineralização dos resíduos da parte aérea e radicular do NF, e aumentando a biodisponibilidade de P no solo, sendo um fator primordial para a justificativa de uso desta planta de cobertura em sistemas de cultivos para aumentar a disponibilidade de P, associado a ciclagem de N.

Ainda, pode-se observar que as gramíneas apresentaram menores valores de P, seguindo a tendência até mesmo em consórcio com NF e E (ApNFE) na camada

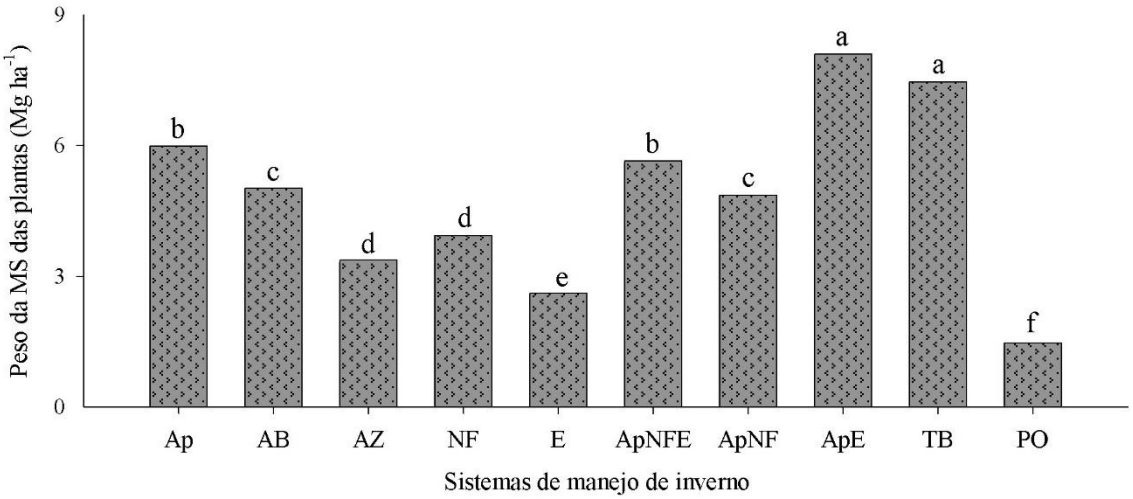
ISBN 978-65-990392-6-3

superficial, além dos demais consórcios nas camadas de 0,05 - 0,10 e 0,10 - 0,15 m, devido a alguns fatores, como os menores teores de P na fitomassa e no solo cultivado com Ap, em relação ao NF solteiro ou consorciado com Ap ou centeio Martins et al., (2013), e a imobilização de P proporcionada pelos resíduos com menor relação C/N e C/P (CASALI et al., 2011), não possibilitando o aumento da disponibilidade no solo.

Já os teores disponíveis de K no solo diferiram entre os sistemas de manejo de inverno apenas nas duas primeiras camadas superficiais do solo, destacando-se os maiores valores na camada de 0,00 - 0,05 m nos sistemas com gramíneas Ap e AB, e nos consórcios ApNFE e ApE. Não por acaso, esses sistemas de manejo de inverno são alguns dos que apresentam maiores produções de MS (Figura 1), produzindo no mínimo 5,02 Mg ha^{-1} (AB), chegando até 8,10 Mg ha^{-1} com o consórcio ApE, que por sua vez também apresentou os maiores valores de K disponível, também na camada de 0,05 - 0,10 m.

Giacomini et al. (2003b) relataram que o acúmulo de K por gramíneas, enquanto alguns trabalhos de pesquisa Santi et al., (2003); Melo et al., (2011) destacam a importância da ciclagem de K fornecida por sistemas que contenham gramíneas, principalmente Ap, devido a maior produção de MS, sendo está uma importante estratégia para reduzir as perdas por lixiviação na entressafra de culturas comerciais, devido ao sistema radicular profundo.

Figura 1 – Produção de matéria seca (MS, Mg ha^{-1}) em dez sistemas de manejo de inverno. Frederico Westphalen - RS.



Legenda: Valores seguidos pela mesma letra minúscula não diferem significativamente pelo teste de Scott-Knott (p≤ 0,05).
Fonte: Diego Armando Amaro da Silva (2024)

Da mesma forma, nota-se que os sistemas AZ e PO apresentaram menores teores de K em superfície no solo, provavelmente devido a baixa produção de MS, sendo que, os valores de MS variaram de 3,37 Mg ha^{-1} para AZ, a apenas 1,47 Mg ha^{-1} no PO (Figura 1), mostrando que o K possui uma dinâmica diferenciada dos demais nutrientes, se tornando prontamente disponível no solo a partir da degradação dos resíduos culturais. Melo et al. (2011) também

ISBN 978-65-990392-6-3

encontrou desfavorecimento do PO nos teores de K observados no solo, devido a pouca produção de MS, e o baixo conteúdo deste nutriente na parte área da vegetação espontânea, além da pouca palhada favorecer a lixiviação do K.

Quanto aos teores das bases Ca e Mg no solo, relação Ca/Mg, e consequentemente a CTC, V, e até mesmo o $pH_{água}$, provavelmente devido a correlação existente entre estes atributos (Tabela 5), houve um comportamento muito semelhante, que persistiu desde as camadas mais superficiais até as maiores profundidades analisadas, sendo observado teores menores em sistemas compostos por gramíneas solteiras, como Ap, AB, e por vezes, AZ.

Tabela 5 – Coeficientes de correlação simples de Pearson entre os atributos químicos do solo analisados em dez sistemas de manejo de inverno, Frederico Westphalen - RS.

Atributos	MOS	$pH_{água}$	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V	m	Ca/Mg
MOS	1	0,12*	0,75**	0,76**	0,60**	0,67**	-0,30**	-0,17*	0,75**	0,42**	-0,30**	0,11*
$pH_{água}$		1	0,11*	$0,08^{ns}$	0,55**	0,44**	-0,57**	-0,80**	0,50**	0,76**	-0,51**	0,31**
P			1	0,71**	0,56**	0,55**	-0,21*	-0,25**	0,65**	0,39**	-0,20*	0,18*
K				1	0,50**	0,51**	-0,23**	-0,17*	0,61**	0,35**	-0,23**	0,15*
Ca					1	0,79**	-0,50**	-0,72**	0,92**	0,82**	-0,46**	0,58**
Mg						1	-0,45**	-0,58**	0,88**	0,71**	-0,42**	$-0,02^{ns}$
Al							1	0,67**	-0,52**	-0,78**	0,98**	-0,21*
H+Al								1	-0,64**	-0,93**	0,60**	-0,39**
CTC									1	0,82**	-0,50**	0,33**
V										1	-0,74**	0,38**
m											1	-0,18*
Ca/Mg												1

Legenda: Significativo *(p≤ 0,05) e **(p≤ 0,01); $^{(ns)}$ não significativo.
Fonte: Diego Armando Amaro da Silva (2024)

Correia e Durigan (2008), após apenas dois anos sob SPD, comparando diversas espécies de gramíneas usadas como cobertura do solo e a vegetação espontânea (PO), observaram que esta última proporcionou maiores valores de $pH_{água}$, Ca, Mg, V e CTC que as gramíneas, enquanto estas apresentaram maiores valores de P e MOS que o pousio, resultados condizentes com os encontrados neste trabalho, com exceção dos valores de P, que foram maiores no sistema PO do que os valores encontrados nos sistemas de manejo compostos por gramíneas em monocultivo.

Outro fato relevante, que faz com que o sistema PO apresente valores elevados destes e outros atributos químicos (como o P), é justamente a menor produção de MS (Figura 1), acumulando principalmente em superfície todo o insumo mineral destinado as culturas de verão, resultante de uma menor extração de nutrientes existente nesse sistema de manejo (MELO et al., 2011). Pode-se acrescentar, que devido a menor qualidade física (Nascente et al., 2015), química e biológica proporcionada pelo PO, torna-se ilusória a "qualidade química" por vezes existente neste local, por ser somente superficial, prejudicando em poucos anos a formação de um perfil de enraizamento em profundidade.

Já os sistemas de manejo de inverno com consórcios de plantas (ApNFE, ApNF e ApE), acabam por possuir um sistema radicular diferenciado, explorando diferentes camadas do perfil do solo, e ciclando diferencialmente os nutrientes, os

depositando na camada agricultável e resultando em efeitos diversos no solo devido a produção de diferentes tipos de ácidos orgânicos, tendendo a promover melhorias nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (MEDEIROS e CALEGARI, 2007). O desempenho de plantas de cobertura de outono/inverno, quando consorciadas, é um aspecto ainda pouco estudado no sul do Brasil Medrado et al., (2011), restringindo-se em maior parte entre aveia e ervilhaca Basso (2004), sendo necessário ampliar o número de opções, selecionando-se aquelas espécies que melhor se adaptem ao cultivo consorciado, visando maximizar a produção de matéria seca, a adição de carbono ao solo e o acúmulo de nutrientes (GIACOMINI et al., 2003).

Além disso, a rotação de culturas e o provimento de resíduos vegetais sobre o solo no SPD, promovem aumento da atividade biológica De-Polli e Chada (1989), aumentam a CTC, bem como, melhoram a disponibilidade de nutrientes Eltz et al., (1989), alterando os valores de $pH_{água}$ e diminuindo a saturação por Al (FABIAN, 2009). Assim como encontrado neste trabalho, Amaral et al., (2005) observaram acréscimo de $pH_{água}$ proporcionado pela cultura da ervilhaca, bem como o decréscimo de $pH_{água}$ quando utilizada a aveia preta. Ao contrário do que foi relatado por (CAIRES et al., 2006), que não encontraram efeitos da aveia preta no pH do solo.

Por consequência dos valores de $pH_{água}$, CTC e V encontrados neste trabalho (Tabela 4), os valores de Al, m, e H+Al apresentaram-se baixos ou até mesmo inexistentes, sendo desconsideráveis para serem interpretados, seguindo a tendência de apresentar um gradiente inverso aos demais elementos observados, aumentando sensivelmente conforme a profundidade de solo analisada (Tabela 3).

4 CONCLUSÃO

O sistema NF elevou os teores de P no solo nas três camadas mais superficiais avaliadas (0,00 - 0,05; 0,05 - 0,10 e 0,10 - 0,15 m) quando utilizado de forma solteira, enquanto que as gramíneas (Ap, AB e AZ), proporcionaram redução nos teores de P no solo, imobilizando e reduzindo o P pelo NF quando consorciadas com esta, não sendo observados benefícios aos teores de P no solo.

Os sistemas de manejo com maior produção de MS, proporcionaram aumento nos teores de K nas camadas superficiais do solo, estimulando a utilização de sistemas consorciados, em razão da maior produção de matéria seca.

O uso de sistemas de monoculturas de gramíneas (Ap, AB e AZ), apesar de apresentar teores de K e MOS elevados, ocasionaram, em algumas camadas, o decréscimo dos teores de P, $pH_{água}$, Ca, Mg, CTC e da saturação por bases, caracterizando, desta maneira, sistemas que devem ser evitados em longo prazo, devendo ser rotacionados ou consorciados com outras espécies.

O sistema de manejo de pousio invernal (PO) é o que produz menos MS, resultando em menor extração e ciclagem de nutrientes, promovendo acúmulo superficial do P proveniente da adubação das culturas de verão, e ocasionando maiores perdas de nutrientes facilmente lixiviáveis, como o K pela falta de proteção superficial.

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque (RS) · cotrijal · UFSM

REFERÊNCIAS

AMADO, T. J. C. et al. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 831-843, 2009.

AMARAL, A. S. et al. Resíduos vegetais na superfície do solo afetam a acidez do solo e a eficiência do herbicida Flumetsulam. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 5, p. 789-794, set./out. 2000.

BASSO, C. J. **Épocas de aplicação de nitrogênio para o milho cultivado em sucessão a plantas de cobertura de solo, no sistema plantio direto**. 1999. 91 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

BASTOS, R. B. et al. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 21-31, jan./fev. 2005.

BERTOL, I. et al. Persistência de resíduos culturais de aveia e milho sobre a superfície do solo em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, p. 705-712, 1998.

BRESSAN, S. B. et al. Plantas de cobertura e qualidade química de Latossolo Amarelo sob plantio direto no cerrado maranhense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 4, p. 371–378, 2013.

BOTTEGA, E. L. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.

CAIRES, S. F. et al. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 87-98, 2006.

CASALI, C. A. et al. **Mineralização das formas de fósforo do tecido de plantas de cobertura**. Piracicaba: Informações Agronômicas - IPNI. set. 2011. p. 21-24. (Documentos, n. 135)

CAVALCANTE, V. S. et al. Biomassa e extração de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 521–528, 2012.

COSTA, C. H. M. da; CRUSCIOL, C. A. C.; FERRARI NETO, J.; CASTRO, G. S. A. Efeitos residuais da calagem superficial em solo tropical com plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1633–1642, set. 2016

CORREIA, N. M.; DURIGAN, J. C. Culturas de cobertura e sua influência na fertilidade do solo sob sistema de plantio direto (SPD). **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, n. 4, p. 20-31, 2008.

CHERUBIN, M. R. **Eficiência de malhas amostrais utilizadas na caracterização de atributos químicos em Latossolos manejados com Agricultura de Precisão**. 2013. 101 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2013.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC (CQFS-RS/SC). **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.** 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2016. 376 p.

CORASSA, G. M. **Manejo por ambiente: atributos de solo e desempenho de cultivares de soja**. 2015. 124 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2015.
DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C. Estratégias de manejo para o incremento da eficiência do uso da água no Sistema Plantio Direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 142/143, p. 19-29, jul./out. 2014.

DALCHIAVON, F. C. et al. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob Sistema Plantio Direto. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, p. 453-461, 2012.

DE-POLLI, H.; CHADA, S. S. Adubação verde incorporada ou em cobertura na produção de milho em solo de baixo potencial de produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 287-293, 1989.

ELTZ, F. L. P.; PEIXOTO, R. T. G.; JASTER, F. Efeito de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno Álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 259–267, 1989.

GIACOMINI, S. J. et al. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 325-334, 2003b.

LAURENTII, A. C. C. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo e da vegetação em sistemas integrados de produção. Brasília, DF: **Embrapa**, 2024.

LEAL, O. A.; MORAES, M. T.; FRANCHINI, J. C.; SANTI, A. L.; SANTOS, D. R.; MARTIN, T. N. Linking cover crop residue quality and tillage system to CO_2-C emission, soil C and N stocks and crop yield based on a long-term experiment. **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 12, p. 1-17, 2020.

LEMAGO, E. et al. Effect of agricultural land management practices on the selected soil quality indicators: empirical evidences from the South Ethiopian highlands. **Environmental Systems Research**, v. 12, n. 2, 2023.

MALUF, J. R. T. Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, p. 141-150, 2000.

MANNIGEL, A. R. et al. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho de cerrado cultivado com algodão sob diferentes preparos e adubações. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, Maringá, v.2, n.1, p. 41-54, jan./abr. 2009.

MARTINS, R. P. **Decomposição e mineralização de nutrientes de resíduos de plantas de cobertura em solo cultivado com cebola (*Allium cepa* L.)**. 2013. 69 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MEDEIROS, G. B.; CALEGARI, A. Sistema Plantio Direto com qualidade: a importância do uso de plantas de cobertura num planejamento cultural estratégico. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 102, p. 10-20, nov./dez. 2007.

MEDRADO, R. D. Decomposição de resíduos culturais e liberação de nitrogênio para a cultura do milho. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 12, n. 2, p. 97-107, mar./abr. 2011.
MELO, A. V. et al. Extração de nutrientes e produção de biomassa de aveia-preta cultivada em solo submetido a dezoito anos de adubação orgânica e mineral. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. 2, p. 411-420, abr./jun. 2011.

MONTEIRO, A. C. G.; PONCIANO, N. J. Índice da qualidade do solo com cana-de-açúcar colhida crua e queimada. **Revista Científica Internacional**, v. 20, n. 1, p. 58-70, jan.-mar. 2012.

MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M.; GIMENEZ, L. M.; GUIMARÃES, V. F. Agricultura de precisão: particularidades de sua adoção no sudoeste de Goiás – Brasil**. Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 4, p. 699-710, jul./ago. 2015.

NASCENTE, A. S.; LI, Y.; CRUSCIOL, C. A. C. Soil Aggregation, Organic Carbon Concentration, and Soil Bulk Density as Affected by Cover Crop Species in a No-Tillage System. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, maio/jun. 2015.

SANTI, A.; AMADO, T. J. C.; ACOSTA, J. A. A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I - Influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1075-1083, 2003.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SILVA, R. F. et al. Fauna edáfica influenciada pelo uso de culturas e consórcios de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 2, p. 130-137, abr./jun. 2013.

ISBN 978-65-990392-6-3

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; FABIAN, A. J. Produção de resíduo vegetal por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 3, p. 421-428, 2008.

VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 143p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 11

METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE INFORMAÇÃO ESPECTRAL E PREDIÇÃO DE PARÂMETROS AGRONÔMICOS NO MILHO UTILIZANDO SENSOR MULTIESPECTRAL EMBARCADO EM VANT

Methodology for selection of spectral information and prediction of agronomic characteristics in corn using a multispectral sensor embedded in a UAV

Charleston dos Santos Lima[1], Ana Júlia Teixeira[1], Bárbara Nogueira[1], André Luís Vian[1], Ivan Ricardo Carvalho[2], Christian Bredemeier[1]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 7712, 91540-000, Porto Alegre – RS, Brasil, charlescep009@gmail.com, anajuliatex3@gmail.com, barbara.nogueira012@gmail.com, andre.vian@ufrgs.br, bredemeier@ufrgs.br
[2] Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Rua do Comércio 3000, 98700-000, Ijuí - RS, Brasil, Ivan.carvalho@unijui.edu.br

RESUMO

O objetivo da presente pesquisa foi: I) avaliar a interação de doses de nitrogênio x cenários (voos: estádio fenológico x safras) e componentes de variância para variáveis de campo e espectrais; II) Predizer as variáveis de campo a partir de índices de vegetação relevantes. O estudo foi conduzido em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições, sendo os tratamentos constituídos de seis doses de nitrogênio em cobertura, durante as safras 22/23 e 23/24. As avaliações de campo e aquisição de imagens foram realizadas em cinco estádios fenológicos. Nossos resultados demonstraram que todos os índices apresentaram efeito da interação doses x cenários (voos: estádios fenológicos x safras). Adicionalmente, os índices com maior confiabilidade foram EXGRaw, TGI, GNDVI, NDRE, CIRE, GVI, CVI, BNDVI, PanNDVI, SRNIRRe, SFDVI, RGBindex, NDVI, SAVI, MSAVI e OSAVI. Finalmente, as variáveis de campo preditas com base na metodologia apresentaram coeficiente de determinação acima de 0,80, exceto para a biomassa e peso de cem grãos. Portanto, conclui-se que os índices de vegetação são afetados de acordo com o cenário testado, contudo, a metodologia RELM-BLUP permitiu a predição com elevada acurácia.

Palavras-chave: Índice vegetação, drones, modelos mistos.

ABSTRACT

The main of this research was: I) to evaluate the interaction of nitrogen doses x scenarios (flights: phenological stage x season) and variance components for field and spectral variables; II) to predict field variables from relevant vegetation indices. The study was conducted in a randomized block design with 4 replications, with treatments consisting of 6 doses of nitrogen (N) as top dressing, during the 22/23 and 23/24 season. Field evaluations and image acquisition were performed at 5 phenological stages. Our results demonstrated that all indexes presented an effect of the dose x scenarios interaction (flights: phenological stages x season). Additionally, the vegetation indices with the highest reliability were EXGRaw, TGI, GNDVI, NDRE, CIRE, GVI, CVI, BNDVI, PanNDVI, SRNIRRe, SFDVI, RGBindex, NDVI, SAVI, MSAVI and OSAVI. Finally, the field variables predicted based on the methodology presented a coefficient of

determination above 0.80, except for biomass and hundred-grain weight. Therefore, it is concluded that vegetation indices are affected according to the tested scenario; however, the RELM-BLUP methodology allowed for highly accurate prediction.

Keywords: Vegetation index, drone, mixed models.

1 INTRODUÇÃO

A fenotipagem de plantas com base em informação espectral tornou-se umas das áreas mais estudadas nos últimos anos, com o propósito de avaliar de forma rápida e não destrutiva a condição morfofisiológica da vegetação, a partir da reflectância das plantas em regiões do espectro eletromagnético visível e infravermelho (XIE; YANG, 2020; CHIVASA et al., 2021; YANG et al., 2022), com a possibilidade de detectar precocemente alterações fisiológicas na vegetação devido a variações nutricionais, disponibilidade de água ou diferença genotípica via informação espectral (COTROZZI et al., 2020; LI et al., 2023; PEREIRA et al., 2025).

Recentemente, a fenômica de plantas evoluiu para a fenotipagem de alto rendimento, com a proposta de utilizar sensores multiespectrais embarcados em veículos aéreos não tripulados (VANT's) para garantir maior resolução espacial, espectral e temporal, o que permite maior velocidade na coleta de dados e alta definição da imagem devido ao menor tamanho de pixel (TAYADE et al., 2022). Isso possibilitou acompanhar a curva de crescimento e tolerância de genótipos a estresses, com avaliações rápidas durante todo o ciclo da cultura (ZHAO et al., 2021; FENG et al., 2021). Contudo, a fenotipagem baseada em VANT's pode ser influenciada por fatores como: temperatura, luminosidade, altura de voo, incremento de biomassa e discrepância entre tratamentos (NJANE et al., 2023; LI et al., 2023). Desta forma, tal interferência pode afetar diretamente a correlação da informação espectral com os parâmetros agronômicos, e tende a reduzir o coeficiente de determinação das predições abaixo de 60% (CHEN et al., 2018; SHRESTHA et al., 2023), com alteração dos melhores índices para a predição de variáveis dependendo do cenário avaliado: genótipos, estádio fenológico e safras (ALVES et al., 2024).

Uma estratégia para contornar o problema pode ser a utilização da metodologia de modelos mistos, a qual permite uma análise dos efeitos fixos e aleatórios que podem influenciar a coleta de dados em experimentos com diferentes genótipos, estádios fenológicos e efeito de ano (safra), a partir da máxima verossimilhança restrita (RELM) e melhor preditor não viesado (BLUP) (CARVALHO et al., 2020). Desta forma, torna-se possível isolar os efeitos genéticos e ambientais, determinar a herdabilidade dos parâmetros e ganho de seleção de genótipos superiores, assim como estimar o coeficiente do erro para cada variável espectral em múltiplos cenários de estudo (RESENDE et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2023). Recentemente, Adak et al. (2021) avaliaram cem híbridos de milho em diferentes épocas de semeadura e momentos de voo, os quais constataram que os índices RGBindex, VARI e VEG foram fortemente afetados pelo estádio fenológico analisado, seguido de maior efeito residual. Logo, análises temporais de índices de vegetação combinadas com técnicas de modelagem podem auxiliar na identificação de preditores estáveis, o que permite maior acurácia de predição para variáveis de campo (ALVES et al., 2024).

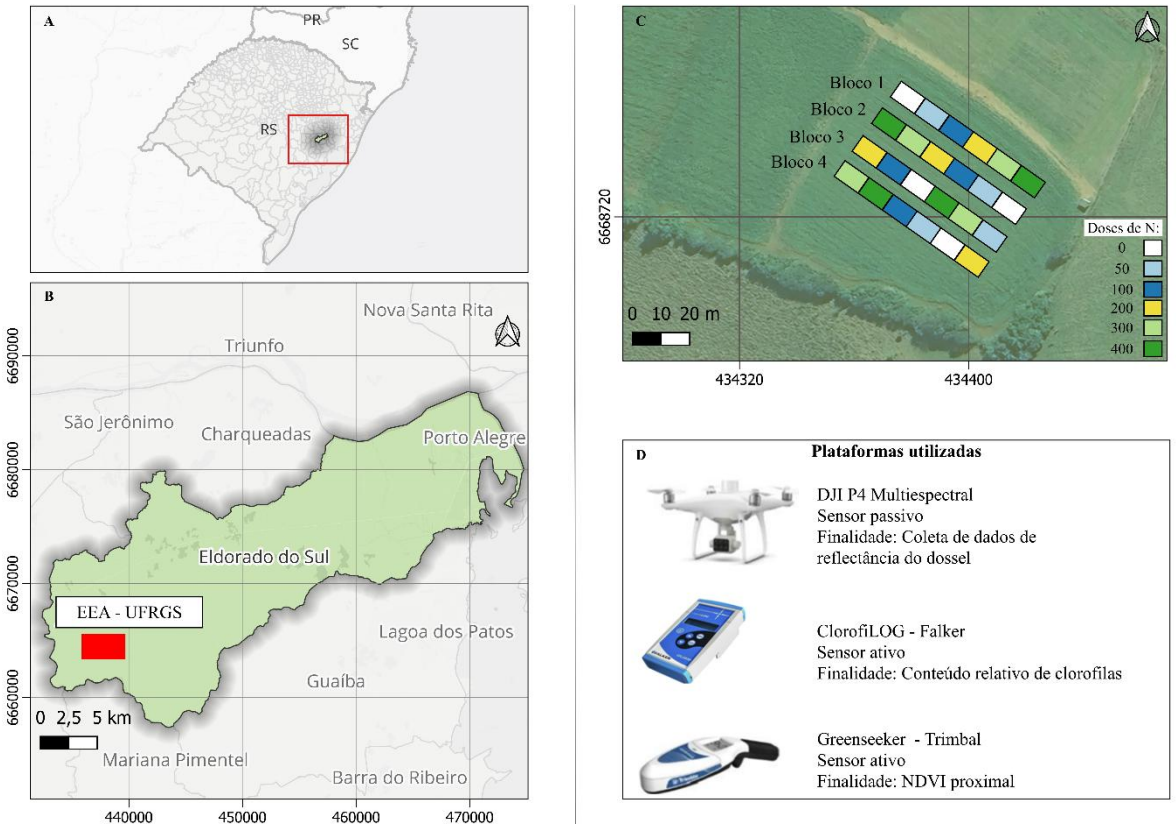
ISBN 978-65-990392-6-3

O objetivo da presente pesquisa foi: I) avaliar a interação de doses de nitrogênio x cenários (voos: estádio fenológico x safras) e componentes de variância para variáveis de campo e espectrais; II) Predizer as variáveis de campo a partir de índices fenômicos relevantes encontrados pela metodologia.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido nas safras 2022/2023 e 2023/2024, na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA-UFRGS), situada no município de Eldorado do Sul/RS (434388,2 Sul, 6668671 Oeste) (Figura 1A, B). Foi utilizado o delineamento experimental de blocos casualizados com 4 repetições, sendo os tratamentos constituídos de seis doses de nitrogênio (N) em cobertura (0, 50, 100, 200, 300 e 400 kg ha^{-1}), para a obtenção de maior variabilidade espacial na coleta dos dados. A aplicação de N foi realizada de forma única no estádio fenológico de cinco folhas (V5) de acordo com as respectivas doses (Figura 1C).

Figura 1 - Mapa de localização da área experimental (A e B), delineamento experimental (C) e plataformas do sensoriamento remoto utilizadas (D).



A semeadura do híbrido P3016 VYHR foi realizada na segunda quinzena de outubro em sistema plantio direto com densidade de 8 plantas m² em ambos os anos. As parcelas experimentais eram constituídas por 5 linhas de 5 metros (m) de comprimento e espaçamento de 0,50 m. Contudo, a área útil considerada foram as 3 linhas centrais e 4 m de comprimento, totalizando 6 m². A adubação de base foi realizada no sulco de semeadura com 20 kg ha^{-1} N, 120 kg ha^{-1} P2O5 e 60 kg ha^{-1}

K2O. O controle de plantas daninhas foi realizado a partir da aplicação da mistura dos princípios ativos Glifosato (3 L ha^{-1}) + Atrazina (4 L ha^{-1}), com o propósito de manter as parcelas sem a presença de invasoras e possível interferência na extração dos índices. Demais tratos culturais foram feitos de acordo com as recomendações técnicas da cultura do milho

A avaliação manual no campo foi realizada nos estádios fenológicos V8 (oito folhas completamente expandidas), V11, V18, R2 (grão bolha d'água) e R5 (formação do dente no grão) na safra 2022/2023 e nos estádios V6, V8, V13, R2 e R5 na safra 2023/2024. Em cada avaliação manual de campo, determinou-se: a altura em 10 plantas de cada parcela e a biomassa de plantas a partir do corte de três plantas de cada parcela, as quais foram secas em estufa de ar forçado a 60 ºC para posterior determinação da biomassa seca (kg ha^{-1}). Após a pesagem das plantas, realizou-se a moagem do material em moinho tipo *willey* e determinação do percentual de nitrogênio no tecido vegetal (N_planta).

Sensores proximais portáteis também foram utilizados. Desta forma, mediu-se o conteúdo de clorofila total (CHLT) em cada estádio fenológico via método *Sinal, Análise de Plantas e Diagnose* (SPAD), com auxílio do clorofilog (Figura 1D), sendo as medições efetuadas em 10 plantas por parcela na última folha completamente expandida e na folha da espiga após o estádio reprodutivo (Argenta et al., 2004). Adicionalmente, foi realizada a leitura do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) com auxílio do *Greenseeker* (Trimble), equipado com um sensor ativo que emite radiação em comprimento de onda no vermelho (660 nm) e infravermelho próximo (790 nm) (Figura 1D). No estádio fenológico R6 realizou-se a colheita das espigas presentes na área útil, sendo determinado o número de grãos por espiga (NGE), peso de cem grãos (PCG) e produtividade de grãos. A produtividade foi convertida para quilogramas por hectare (kg ha^{-1}) e umidade dos grãos padronizada em 13%.

A coleta de imagens para avaliação espectral das parcelas submetidas as diferentes doses de N foram realizadas no mesmo dia da avaliação das variáveis de campo, com auxílio de *VANT* de asa rotativa *DJI Phantom 4 RTK multiespectral* (Figura 1D), com o plano de voo e controle autônomo via aplicativo Pix4D. As configurações gerais de voo consistiram de sobreposição frontal e lateral de 75%, altura de voo de 30 metros e ângulo da câmera de 90º (Nadir). O horário para a coleta de imagens foi o mesmo para todos os voos, os quais foram executados entre 11:00 a 14:00h. Adicionalmente, utilizou-se o sensor de calibração (*sunshine sensor*) acoplado na extremidade superior do VANT para correção radiométrica das imagens.

O processamento de imagens foi realizado no software *Agisoft Metashape* para construção dos ortomosaicos, um para cada voo. Tais ortomosaicos foram associados a informações de sete pontos de controle de solo georreferenciados com GNSS-RTK para correção geométrica das fotos. Posteriormente, realizou-se a extração de informações espectrais dos ortomosaicos no software *Qgis*. Finalmente, realizou-se o cálculo de diferentes índices de vegetação na região do visível e multiespectral a partir de fórmula matemática específica para cada índice e demais análises estatísticas (Figura 2, Tabela 1).

Figura 2 - Fluxo de trabalho para a aquisição de imagens e análise dos dados durante a safra 22/23 e 23/24.

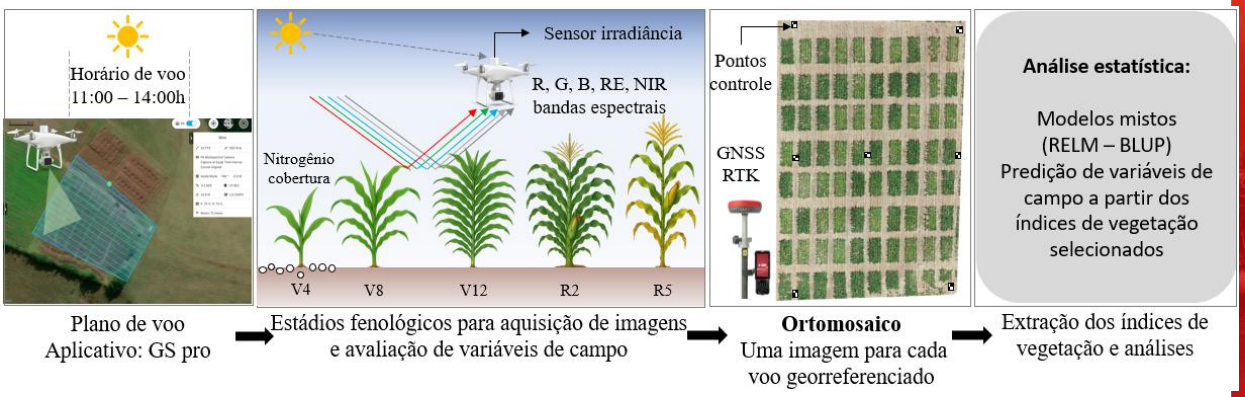


Tabela 1 - Lista de índices de vegetação utilizados no estudo nas safras 22/23 e 23/24.

Tipo	Índices de vegetação	Equação
RGB	Excesso de verde	EXG= 2*(G(R+G+B))-(R/(R+G+B))-B/(R+G+B))
	Excesso de verde raw	EXGRaw= 2*G-R-B
	Excesso de vermelho	EXR= (1.4*R-G)/(R+G+B)
	Excesso de vermelho raw	ExRRaw = 1.4*R-G
	Índice cor da extração da vegetação	CIVE= (0.44*R-0.81*G+0.39*B)/(R+G+B)+ 18.79
	Índice verde-vermelho normalizado	GRVI= (G – R) / (G + R)
	Excesso de vermelho modificado	ExRM = (2*R-G-B) / (R+G+B)
	Índice vegetativo	VEG= g/((r^a)*(b^(1-a))) a=0.667, r=R/(R+G+B), g=G/(G+R+B), b=B/(R+G+B)
	Excesso de azul	ExB= (1.4*B-G)/(R+G+B)
	Diferença normalizada do azul	NDB= (G-B)/(G+B)
	Índice resistente à atmosfera no visível	VARI= (G–R)/(G+R+B)
	Índice de folha verde	GLI= ((G-R)+(G-B))/(2*G+R+B)
	Índice verde triangular	TGI= (-0.5)*[(190)*(R-G)-(120)*(R-B)]/(R+G+B)
	Índice vermelho-Azul	RBI= (R-B)/(R+B)
	Índice verde-vermelho modificado	MGRVI= $(G^2-R^2)/(G^2+R^2)$
	Índice RGB	RGBindex= $(G^2-B*R)/(G^2+B*R)$

MULTIESPECTRAL	Diferença normalizada	NDVI= (NIR - R) / (NIR + R)
	Borda do vermelho	NDRE= (NIR – RE) / (NIR + RE)
	Índice ajustado ao solo	SAVI= (1 + 0.5) * [(NIR – R)/(NIR + R + 0.5)]
	Índice ajustado ao solo modificado	MSAVI= (2*NIR+1−sqrt((2*NIR+1)*2–8*(NIR−R)))/2
	Índice ajustado ao solo otimizado	OSAVI= (1+0.5)*((NIR-R)/(NIR+R+0.5))
	Índice de vegetação melhorado	EVI= 2.5*(NIR-R)/(NIR+6*R -7.5*B+1)
	Diferença normalizado do verde	GNDVI= ((NIR-G)/(NIR+G))
	Índice de clorofila-verde	CIG= NIR/G-1
	Índice de clorofila Rededge	CI-RE= NIR/RE-1
	Índice simples razão	RVI= NIR/R
	Índice diferença da vegetação	DVI= NIR-R
	Índice diferença da vegetação verde	GDVI= NIR-G
	Índice de vegetação razão verde	GVI= NIR/G
	Índice de vegetação-clorofila	CVI= NIR*(R/G²)
	Índice de vegetação melhorado 2	EVI2 = 2.5*(NIR-R)/(NIR+2.4*R+1)
	Diferença normalizada do azul	BNDVI= (NIR-B)/(NIR+B)
	Diferença normalizada R-Re	NDVIRE= (RE-R)/(RE+R)
	PanNDVI	PanNDVI= NIR-(G+R+B)/ NIR+(G+R+B)
	Razão simples NIR/RE	SRNIRRe= NIR/RE
	Profundidade de feição espectral	SFDVI= ((NIR+G)/2)-((R+NIR)/2)

Para verificar o efeito de cenários (voos), safra (anos) e a interação entre eles, aplicou-se o teste da máxima verossimilhança restrita (RELM), a fim de se obter a análise dos componentes de variância e valores estimados para cada variável. Neste sentido, foi avaliado a significância da interação entre os fatores a partir da análise *deviance* ($p<0.05$), com intuito de observar a influência das doses de nitrogênio e cenários (voos e safras), na resposta espectral de tais variáveis. Posteriormente, avaliou-se os componentes da variância: Variância fenotípica, herdabilidade (H2), acurácia e coeficiente de variação do erro (CVr). Tal procedimento baseia-se no modelo estatístico: $Yij = \mu + Bj + Gi + Ej + \varepsilon ij$. Onde: Yij é o valor mensurado para cada variável em cada parcela, Bj é o efeito de bloco (fixo), Gj indica o efeito atribuído aos efeitos fixos (Doses N), Ej representa o efeito de ambiente ou cenários avaliados (safras x voos) e εij o efeito associado ao erro experimental.

A partir da separação e quantificação dos efeitos associados, novos valores foram estimados pelo melhor preditor linear não viesado (BLUP). Obtendo-se, portanto, uma nova média para cada variável analisada, sem a interferência do ambiente (voos e safras). Após a identificação dos índices com melhor confiabilidade e estabilidade, uma análise multivariada foi realizada para verificar a predição das variáveis de campo a partir dos índices fenômicos selecionados via regressão por *stepwise*, de modo que, apenas os parâmetros espectrais significativos foram mantidos dentro do modelo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de *deviance* pelo teste *LRT* demonstrou efeito significativo para a interação Doses x Cenários para todos os índices ($p<0,05$), sem distinção entre índices RGB ou multiespectrais (Tabela 2). Tal resultado também foi observado para as variáveis de campo, exceto para o peso de cem grãos (PCG). Neste sentido, Alves et al. (2024) verificaram que a variação de índices de vegetação coletados em diferentes datas de voos (estádios fisiológicos), pode ser explicada pela modificação fisiológica e morfológica que as plantas expressam ao longo do seu desenvolvimento. Isso está relacionado as alterações na estrutura das folhas, composição química e interação com o ambiente, o que tende a alterar a reflectância da luz e, consequentemente, a dinâmica dos índices de vegetação (FENG et al., 2021).

Tabela 2. Análise de deviance pelo teste de máxima verossimilhança (*LRT*) p<0.05.

Model	**EXG**	**EXGRaw**	**EXR**	**EXRRaw**	**CIVE**	**GRVI**	**EXRM**
Doses N	5.24E-07	2.21E-09	0.00253	0.00057	2.46E-09	0.00389	0.24621
Doses*cenário	9.09E-05	1.72E-19	2.99E-11	1.62E-16	5.50E-19	1.31E-14	2.54E-21
Model	**VEG**	**EXB**	**NDB**	**VARI**	**GLI**	**TGI**	**RBI**
Doses N	5.36E-06	0.00262	0.01216	0.00969	0.06862	2.43E-09	1,00000
Doses*cenário	4.60E-12	6.69E-19	2.87E-28	3.62E-24	5.35E-16	9.89E-21	1.73E-48
Model	**MGRVI**	**RGBindex**	**NDVI**	**SAVI**	**MSAVI**	**OSAVI**	**EVI**
Doses N	0.00514	4.18E-08	2.32E-07	2.19E-07	9.61E-07	2.32E-07	0.56113
Doses*cenário	4.27E-08	1.71E-05	2.96E-10	2.83E-10	2.01E-08	2.96E-10	3.49E-07
Model	**GNDVI**	**CIG**	**NDRE**	**CIRE**	**RVI**	**DVI**	**GDVI**
Doses N	2.35E-14	3.03E-12	1.59E-	8.02E-12	1.20E-10	9.48E-12	6.69E-14

Doses*cenário	4.86E-06	3.88E-10	1.46E-27	5.06E-31	5.99E-06	3.65E-03	4.34E-02

Model	GVI	CVI	EVI2	BNDVI	NDVIRe	PanNDVI	SRNIRRe
Doses N	3.03E-12	1.76E-12	5.78E-08	2.62E-11	8.48E-02	1.58E-13	1.58E-12
Doses*cenário	3.88E-10	6.33E-14	9.42E-11	1.11E-05	8.08E-06	2.85E-05	2.50E-19

Model	SFDVI	NDVIG	CHLT	Altura planta	Biomassa	NGE	PCG
Doses N	3.15E-14	5.7E-08	1.3E-09	9.4E-11	2.41E- 6	0.11902	0.04193
Doses*cenário	2.43E-03	4.3E-07	1.7E-22	3.8E-27	5.22E-29	1.5E-08	0.24488

Model	Produtividade	N_planta
Doses N	0.13656	1.59E-12
Doses*cenário	1.9E-08	6.50e-13

Os índices fenômicos que apresentaram adequada qualidade dos dados foram avaliados quanto a herdabilidade (H^2) e coeficiente de variação residual (CVr) (Tabela 3). Logo, constatou-se que os índices EXGRaw, TGI, GNDVI, NDRE, CIRE, GVI, CVI, BNDVI, PanNDVI, SRNIRRe e SFDVI apresentaram alta herdabilidade (>50%) e coeficiente de variação residual intermediário (≤10%). Por outro lado, os índices RGBindex, NDVI, SAVI, MSAVI e OSAVI, demonstraram menores valores de herdabilidade (<40%), contudo, o coeficiente de variação residual manteve-se abaixo de 5%. Logo, tais índices possuem um elevado potencial para serem utilizados na predição de características agronômicas, devido a maior estabilidade dos dados sob diferentes cenários. Adicionalmente, a acurácia de todas as variáveis espectrais manteve-se acima de 70% (Tabela 3), contudo, percebe-se que os índices que apresentaram maior herdabilidade e menor coeficiente de variação residual, apresentaram acurácia superior a 95%. Isso sugere que o controle experimental foi adequado e os valores coletados e analisados refletem apenas o comportamento dos tratamentos.

A análise de máxima verossimilhança restrita (RELM) é um método para estimação dos componentes de variância e parâmetros de herdabilidade do conjunto de dados, o que permite a identificação de variáveis significativas, com alta herdabilidade, menor influência do erro experimental e confiabilidade em modelos de predição (RESENDE, 2016; CARVALHO et al., 2020).

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 3. Estimativa dos componentes de variância pela máxima verossimilhança restrita (REML) para as variáveis analisadas em cinco estágios fenológicos distintos e duas safras.

Parâmetros	Variância fenotípca	Herdabilidade	Acurácia	CVr
EXG	0.002160972	0.298322576	0.9565	7.72687
EXGRaw	34022.94092	0.502042235	0.9707	10.4995
EXR	0.001367014	0.173048153	0.89522	24.022
CIVE	5511.530079	0.498192153	0.9705	11.5138
GRVI	0.001771366	0.174529284	0.8885	9.49921
EXRM	0.002733207	0.060379092	0.70918	16.0389
VEG	0.02571401	0.31587324	0.94709	5.1861
EXB	0.000701777	0.197243604	0.89478	12.7299
NDB	0.000946425	0.170802888	0.86545	5.14314
VARI	0.005576628	0.171254055	0.87066	9.03051
GLI	0.000652438	0.097034947	0.80576	2.64288
TGI	8538.502439	0.505190614	0.97052	10.0706
MGRVI	0.003257385	0.142385462	0.88354	8.40255
RGBindex	0.001616469	0.35254211	0.9641	5.14621
NDVI	0.002306615	0.420698934	0.96702	3.86299
SAVI	0.004774655	0.367891171	0.95936	3.87187
MSAVI	0.001138486	0.325164107	0.95431	2.67695
OSAVI	0.002306721	0.420699554	0.96702	3.86297
GNDVI	0.005282602	0.690480478	0.99009	5.2412
CIG	1.464103084	0.660117711	0.98657	13.223
NDRE	0.003147606	0.668118211	0.9834	7.02357
CIRE	0.054607787	0.623926922	0.97931	10.1084
RVI	3.132649066	0.456132875	0.97568	11.9591
DVI	279301.621	0.448005783	0.97911	9.33951
GDVI	400991.2332	0.599258444	0.98944	10.0743
GVI	1.464103083	0.660117711	0.98657	10.5603
CVI	0.53109168	0.690550917	0.98703	10.8016
EVI2	0.017953289	0.396504174	0.96324	5.01772
BNDVI	0.001351255	0.581385526	0.98453	2.43715
NDVIRe	0.001910347	0.087256701	0.82652	5.34105
PanNDVI	0.009213034	0.654627705	0.98886	12.2851
SRNIRRe	0.065328767	0.713469828	0.98712	4.52934
SFDVI	56236.84554	0.644381308	0.98991	9.72557
NDVIG	0.002567746	0.455806328	0.97299	4.62018
CHLT	55.0014609	0.620730963	0.9797	5.87724
Altura de planta	361.608103	0.625459854	0.9796	4.24519
Biomassa	10454575	0.4350	0.9530	18.0000
NGE	10553.18567	0.588555621	0.9733	8.31013
PCG	16.06307227	0.551315445	0.9852	8.26493
Produtividade	10186376.14	0.565259238	0.9708	11.42764
N_planta	0.3180	0.6910	0.9870	12.00

A herdabilidade de uma característica pode ser definida pela capacidade da mesma ser herdada entre plantas e gerações (proporção da variância fenotípica

associada a variância genética) ou quantificada independente das condições ambientais do experimento, obtendo-se variáveis relevantes quando as mesmas apresentarem H^2>50% e baixo erro experimental (CVe<10%) (RESENDE; DUARTE, 2007; BERNARDO, 2020). Logo, constatou-se que os índices EXGRaw, TGI, GNDVI, NDRE, CIRE, GVI, CVI, BNDVI, PanNDVI, SRNIRRe e SFDVI apresentaram alta herdabilidade (>50%) e coeficiente de variação residual intermediário (≤10%). Tais dados corroboram com os resultados obtidos por Lima et al. (2024), a partir da avaliação dos componentes de variância de 40 índices de vegetação em cultivares de soja submetidas ao alagamento via drone, os quais identificaram H^2>60% e baixo CVe para os índices EXGRaw, GNDVI, NDRE, CIRE, BNDVI e SFDVI. Adicionalmente, Adak et al. (2021), ressaltaram que a maioria dos índices de vegetação são influenciados pelo momento de voo e condição experimental, obtendo-se maior contribuição dos cenários e menor herdabilidade para os índices EXG, GLI, MGRVI, RGBindex e VARI. Similar aos resultados obtidos no presente estudo. Embora a herdabilidade tenha sido avaliada apenas para uma cultivar, a mesma está associada a estabilidade e repetibilidade do comportamento dos parâmetros espectrais ao longo das safras, o que torna a metodologia de elevado impacto na identificação de índices relevantes.

Com base na resposta observada para a os diferentes índices de vegetação e atributos de campo, buscou-se estabelecer um modelo de predição para as variáveis de campo com base em informação espectral relevante via regressão por *stepwise*, sendo apresentado o intercepto do modelo linear multivariado e o coeficiente angular de cada índice de vegetação (Tabela 4). Nesse sentido, constatou-se que a metodologia adotada no presente estudo permitiu a predição com elevada acurácia para a maioria das variáveis de campo (r^2>0,80), exceto a Biomassa e peso de cem grãos as quais apresentaram menor coeficiente de determinação, 0,71 e 0,65, respectivamente.

A coleta de dados biométricos manuais no campo ainda é uma prática usual que caracteriza a fenotipagem clássica de plantas, tanto para analisar diferenças genotípicas como na avaliação de manejos específicos aplicados (RUI et al., 2024). Embora tal metodologia seja eficiente na avaliação de plantas, tal prática constitui um gargalo para o melhoramento genético
e avaliação de experimentos, devido à baixa capacidade operacional e custos com mão de obra, o que demanda novas abordagens para acelerar esses processos (ARAUS et al., 2014). Contudo, parâmetros com alta herdabilidade e baixo coeficiente de variação residual como altura de plantas e clorofilas totais (Tabela 2), podem ser importantes preditores na fenotipagem de plantas, pois independente da dose de N ou cenário avaliado tais parâmetros mantém alta herdabilidade e possibilita a seleção de genótipos com maior biomassa, concentração de nitrogênio, resistência ao acamamento e produtividade de grãos (PREY et al., 2020; STUBBS et al., 2023).

Conforme a metodologia proposta no presente estudo, foi possível obter uma acurácia de predição satisfatória (r^2>0,80) para a maioria das variáveis de campo, apenas com os índices de vegetação relevantes identificados pelo modelo de regressão multivariado (Tabela 4). Logo, a metodologia permitiu a criação de uma função para cada parâmetro de campo com todos os dados de voos e diferentes safras, após a aplicação das técnicas de RELM-BLUP e identificação de índices fenômicos significativos dentro do modelo de predição via regressão por stepwise. Tal procedimento é fundamental para reduzir os fatores de variação associados ao erro

experimental, identificação de variáveis confiáveis, evitar a multicolinearidade, reduzir a dimensionalidade de variáveis independentes e identificar preditores relevantes para compor a função (ABBASI et al., 2019; ADAK et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2023).

Tabela 4. Modelo linear multivariado para cada variável de campo a partir de índices de vegetação identificados pela metodologia.

Variável predita	Índice de vegetação selecionado	R^2	p<0,05
NDVIG *(Intercepto:6,38)	**(0,003) EXRRaw, (-0,03) CIVE, (-3,0) VEG, (17,36) EXB, (59,65) NDB, (-0,02) TGI, (-19,69) RBI, (3,94) MGRVI, (-24,47) RGBindex, (3730) NDVI, (-2481) SAVI, (-11,65) GNDVI, (0,0003) DVI, (-2,83) EVI2, (-3,30) NDVIRe, (9,73) PanNDVI, (-0,001) SFDVI	0,93	2.2e-16
CHLT (Intercepto:1450)	(5757) EXR, (-0,07) EXRRaw, (0,04) CIVE, (-4421) EXRM, (4529) NDB, (-4299) GLI, (-1189) RBI, (1473) MGRVI, (-1987) RGBindex, (-15,71) CIRE, (2,20) GVI, (84,64) EVI2, (-194) NDVIRe	0,86	2.2e-16
Altura de plantas (Intercepto: -60910)	(117800) EXR, (1,68) CIVE, (74660) GRVI, (37530) NDB, (-6745) VARI, (92030) GLI, (0,97) TGI, (-26700) RGBindex, (-268,60) CIG, (2008) NDRE, (70,05) RVI, (191,60) CVI, (-3249) BNDVI, (2095) NDVIRe	0,89	2.2e-16
Biomassa (Intercepto:-28000000)	(25860000) EXR, (21930000) GRVI, (21510000) EXRM, (-503500) VEG, (19100000) NDB, (50270000) GLI, (-6657000) RBI, (1308000) MGRVI, (-15950000) RGBindex, (204500000) NDVI, (-136300000) SAVI, (-1122) EVI, (-2947) CIG, (44410) NDRE, (-285500) BNDVI, (158100) PanNDVI	0,71	2.2e-16
N_Planta (Intercepto:1667)	(-2975) EXR, (-1502) GRVI, (40,29) VEG, (-1683) NDB, (76,47) VARI, (-2635) GLI, (0,005) TGI, (344,10) RBI, (959) RGBindex, (28,50) OSAVI, (0,43) CIG, (-1,41) CIRE, (-17,94) EVI2, (24,63) BNDVI	0,87	2.2e-16
NGE (Intercepto:95389)	(-300483) EXR, (231189) EXB, (-118205) MGRVI, (50691) RGBindex, (65919) SAVI, (6727) CIG, (-2683) CIRE, (-2773) RVI, (-4105) CVI, (-101759) EVI2, (-47033) BNDVI, (-17368) NDVIRe, (142005) PanNDVI, (125000) NDB	0,80	4.1e-10
PCG (Intercepto: -7230)	(6518) EXRM, (-280) VARI, (13488) GLI, (-1478) RGBindex, (-118) CIG, (50) RVI, (84) CVI, (609) EVI2, (168) NDVIRe, (-1238) PanNDVI	0,65	1.1e-07
Produtividade (Intercepto:-4217772)	(4862062) EXRM, (320572) VEG, (-1559654) NDB, (8022900) GLI, (22051) GNDVI, (14563) CIG, (307968) NDRE, (-26282) CVI, (-70675) SRNIRRe	0,85	1.1e-14

NDVIG: NDVI do greenseeker, N_Planta: concentração de nitrogênio (%) no tecido vegetal; CHLT: clorofila total, NGE: número de grãos por espiga, PCG: peso de cem grãos, Biomassa: biomassa total de plantas (kg ha^{-1}), Produtividade de grãos (kg ha^{-1}). * Valor do intercepto da equação para cada modelo; ** coeficiente angular para cada índice de vegetação dentro do modelo.

Diversos modelos de predição têm sido testados ao longo do tempo, com variações quanto ao tipo de modelo (linear ou não linear), bem como a complexidade estabelecida para cada ferramenta utilizada. Neste sentido, os modelos Randon Forest e Suport Vector Machine tem sido validados pela pesquisa como as principais ferramentas de predição para variáveis relacionadas ao rendimento, concentração de nutrientes e produção de biomassa devido a elevada acurácia de predição (r^2>0,70) (LEE et al., 2020; GE et al., 2025). Contudo, o treinamento desses modelos com dados multicolineares, elevado efeito residual, baixa confiabilidade e maior complexidade no processamento podem explicar a baixa utilização dos mesmos na fenotipagem de plantas.

Modelos de regressão linear múltipla são amplamente utilizados no sensoriamento remoto agrícola, porém, tendem a apresentar baixa acurácia de predição ao trabalhar com grandes volumes de dados espectrais (FEI et al., 2023). Contudo, ferramentas para seleção de características, redução da dimensionalidade e multicolinearidade podem melhorar significativamente a performance desses modelos simples, obtendo-se melhor caracterização do estado fisiológico de plantas a partir de modelo de regressão linear baseado em poucos preditores (KRISHNA et al., 2019; ZHANG et al., 2021; FEI et al., 2023; NAGY et al., 2024). Logo, o presente estudo destaca a relevância da metodologia proposta para criar o modelo ideal conforme os cenários de estudo, a partir de índices de vegetação com informação espectral relevante e fácil aplicação dos valores coletados em uma equação resposta

4 CONCLUSÃO

A predição de características agronômicas demanda um entendimento amplo de fatores associados ao ambiente estudo, espécie de planta, estádios fenológicos críticos e variação de safras, com a necessidade de considerar tais fatores para a correta seleção de variáveis preditoras e modelagem adequada. Desta forma, concluiu-se que:

I) Todos os índices de vegetação são influenciados pelos fatores: doses de N e cenários analisados (estádios fenológicos x safras), obtendo-se maior herdabilidade e menor coeficiente de variação do erro para os índices: EXGRaw, TGI, GNDVI, NDRE, CIRE, GVI, CVI, BNDVI, PanNDVI, SRNIRRe e SFDVI.

II) A predição de variáveis a partir da metodologia proposta no presente estudo permitiu identificar os melhores índices para estimar todas as variáveis de campo, com elevada acurácia a partir de modelo linear multivariado simples.

REFERÊNCIAS

ABBASI, M.; VERRELST, J.; MIZAEI, M.; MAROFI, S.; BAKHTIARI, H. R. R. Optimal spectral wavelengths for discriminating orchard species using multivariate statistical techniques. **Remote Sensing**, v. 12, p. 1-16, 2020. https://doi.org/10.3390/rs12010063

ADAK, A.; MURRAY, S. C.; BOZINOVIC, S.; LINDSEY, R.; NAKASAGGA, S.; CHATTERJEE, S.; ANDERSON II, S. L.; WILDE, S. Temporal vegetation indices and plant height from remotely sensed imagery can predict grain yield and flowering time

breeding value in maize via machine learning regression. **Remote sensing**, v. 13, P. 1-21, 2021. https://doi.org/10.3390/rs13112141

ALVES, A. K. S.; ARAÚJO, M. S.; CHAVES, S. F. S.; DIAS, L. A. S.; CORREDO, L. P.; PESSOA, G. G. F. A.; BEZERRA, A. R. G. High throughput phenotyping in soybean breeding using RGB image vegetation indices based on drone. **Scientific Reports**, v. 14, p. 1-11, 2024. https://doi.org/10.1038/s41598-024-83807-4

ARAUS, J. L.; CAIRNS, J. E. Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. **Trends in Plant Science**, v. 19, p. 52-61, 2014. http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2013.09.008

BERNARDO, R. Reinventing quantitative genetics for plant breeding: something old, something new, something borrowed, something BLUE. **Heredity**, v. 125, p. 375 – 385, 2020. https://doi.org/10.1038/s41437-020-0312-1

CARVALHO, I. R.; SILVA, J. A. G.; FERREIRA, L. L.; SZARESKI, V. J.; DEMARI, G. H.; LAUTENCHLEGER, F.; MENEGHELLO, G. E.; MATTER, E. M.; MAGANO, D. A.; SOUZA, V. Q. REML/BLUP applied to characterize important agronomic traits in segregating generations of bean (Phaseolus vulgaris L.). **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, p. 391 – 399, 2020. DOI: 10.21475/ajcs.20.14.03. p1520

CHEN, D.; SHI, R.; PAPE, J.; NEUMANN, K.; AREND, D.; GRANER, A.; CHEN, M.; KLUKAS, C. Predicting plant biomass accumulation from image-derived parameters. **GigaScience**, v. 7, p. 1-13, 2018. https://doi.org/10.1093/gigascience/giy001

CHIVASA, W.; MUTANGA, O.; BURGUENO, J. UAV-based high-throughput phenotyping to increase prediction and selection accuracy in maize varieties under artificial MSV inoculation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 184, p. 1-14, 2021. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106128

COTROZZI, L.; PERON, R.; TUINSTRA, M. R.; MICKELBART, M. V.; COUTURE, J. J. Spectral phenotyping of physiological and anatomical leaf traits related with maize water status. **Plant Physiology**, v. 184, p. 1363-1377, 2020. https://doi.org/10.1104/pp.20.00577

FEI, S.; XU, D.; CHEN, Z.; XIAO, Y.; MA, Y. MLR-based feature splitting regression for estimating plant traits using high-dimensional hyperspectral reflectance data. **Field Crops Research**, v. 293, p. 1-12, 2023. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108855

FENG, L.; CHEN, S.; ZHANG, C.; ZHANG, Y.; HE, Y. A comprehensive review on recent applications of unmanned aerial vehicle remote sensing with various sensors for high-throughput plant phenotyping. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 182, p. 1-19, 2021. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106033

GE, H.; ZHANG, Q.; SHEN, M.; QIN, Y.; WANG, L.; YUAN, C. Enhancing yield prediction in maize breeding using UAVderived RGB imagery: a novel classification-integrated regression approach. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, p. 1-13, 2025. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1511871

KRISHNA, G.; SAHOO, R. N.; SINGH, P.; BAJPAI, V.; PATRA, H.; KUMAR, S.; DANDAPANI, R.; GUPTA, V. K.; VISWANATHAN, C.; AHMAD, T.; SAHOO, P. M. Comparison of various modelling approaches for water deficit stress monitoring in rice crop through hyperspectral remote sensing. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 231-244, 2019. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.029

LEE, H.; WANG, J.; LEBLON, B. Using linear regression, random forests, and support vector machine with unmanned aerial vehicle multispectral images to predict canopy nitrogen weight in corn. **Remote Sensing**, v. 12, p. 1-20, 2020. https://doi.org/10.3390/rs12132071

LI, C.; CZYZ, E. A.; HALITSCHKE, R.; BALDWIN, I. T.; SCHAEPMAN, M. E.; SCHUMAN, M. C. Evaluating potential of leaf reflectance spectra to monitor plant genetic variation. **Plant Methods**, v. 19, p. 1-28, 2023. https://doi.org/10.1186/s13007-023-01089-9

LIMA, C. S.; JUNIOR, D. F. U.; CARVALHO, I. R.; BREDEMEIER, C. Use of phenomics in the selection of uav-based vegetation indices and prediction of agronomic traits in soybean subjected to flooding. **AgriEngineering**, v. 6, p. 3261-3278, 2024. https://doi.org/10.3390/agriengineering6030186

NAGY, A.; SZABÓ, A.; ELBELTAGI, A.; NXUMALO, G. S.; BÓDI, E. B.; TAMÁS, J. Hyperspectral indices data fusion-based machine learning enhanced by MRMR algorithm for estimating maize chlorophyll content. Frontiers in Plant Science, v. 15, p. 1-18, 2024. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1419316

NJANE, S. N.; TSUDA, S.; MARREWIJK, B. M. V.; GERRIT, P.; KATAYAMA, K.; TSUJI, H. Effect of varying UAV height on the precise estimation of potato crop growth. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1-14, 2023. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1233349

OLIVEIRA, J. F.; ALCÂNTARA, J. F.; SANTANA, D. C.; TEODORO, L. P. R.; BAIO, F. H. R.; CORADI, P. C.; JUNIOR, C. A. S.; TEODORO, P. E. Spectral variables as criteria for selection of soybean genotypes at different vegetative stages. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 32, p. 1-8, 2023. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101026

PEREIRA, H. D.; NONATO, J. V. A.; DUARTE, R. C. R. M.; GERHARDT, I. R.; DANTE, R. A.; ARRUDA, P.; YASSITEPE, J. E. C. T. Temporal field phenomics of transgenic maize events subjected to drought stress: Cross-validation scenarios and machine learning models. **The Plant Phenome Journal**, v. 8, p. 1-16, 2025. https://doi.org/10.1002/ppj2.70015

PREY, L.; HU, Y.; SCHMIDHALTER, U. High-throughput field phenotyping traits of grain yield formation and nitrogen use efficiency: optimizing the selection of vegetation indices and growth stages. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 1-20, 2020. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01672

RESENDE, M. D. V. Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 6, p. 330-339, 2016. https://doi.org/10.1590/1984-70332016v16n4a49

RESENDE, M. D. V.; DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, p. 182 – 194, 2007.

RUI, Z.; ZHANG, Z.; ZHANG, M.; AZIZI, A.; IGATHINATHANE, C.; CEN, H.; VOUGIOUKAS, S.; LI, H.; ZHANG, J.; JIANG, Y.; JIAO, X.; WANG, M.; AMPATZIDIS, Y.; OLADELE, O. I.; VARNAMKHASTI, M.; RADI, R. High-throughput proximal ground

crop phenotyping systems – A comprehensive review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 224, p. 1-22, 2024. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109108

SHRESTHA, A.; BHEEMANAHALLI, R.; ADELI, A.; SAMIAPPAN, S.; CZARNECKI, J. M. P.; MCCRAINE, C. D.; REDDY, K. R.; MOORHEAD, R. Phenological stage and vegetation index for predicting corn yield under rainfed environments. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1-12, 2023. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1168732

SILVA, C. M.; MEZZOMO, H. C.; RIBEIRO, J. P. O.; SIGNORINI, V. S.; LIMA, G. W.; VIEIRA, V. F.; T.; PORTES, M. F.; MOROTA, G.; CORREDO, L. P.; NARDINO, M. Insights on multi-spectral vegetation indices derived from UAV-based high-throughput phenotyping for indirect selection in tropical wheat breeding. **Euphytica**, v. 220, p. 1-17, 2024. https://doi.org/10.1007/s10681-024-03299-1

STUBBS, C. J.; KUNDURU, B.; BOKROS, N.; VERGES, V.; PORTER, J.; COOK, D. D.; DEBOLT, S.; MEMAHAN, C.; SEKHON, R. S.; ROBERTSON, D. J. Moving toward short stature maize: The effect of plant height on maize stalk lodging resistance **Field Crops Research**, v. 300, p. 1-13, 2023. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109008

TAYADE, R.; YOON, J.; LAY, L.; KHAN, A. L.; YOON, Y.; KIM, Y. Utilization of spectral indices for high-throughput phenotyping. **Plants**, v. 11, p. 1-20, 2022. https://doi.org/10.3390/plants11131712
XIE, C.; YANG, C. A review on plant high-throughput phenotyping traits using UAV-based sensors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 178, p. 1-14, 2020. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105731

YANG, B.; ZHU, W.; REZAEI, E. E.; LI, J.; SUN, Z.; ZHANG, J. Optimal Phenological Phase of Maize for Yield Prediction with High Frequency UAV Remote Sensing. **Remote Sensing**, v. 14, p. 1-18, 2022. https://doi.org/10.3390/rs14071559

ZHANG, L.; HAN, W.; NIU, Y.; CHÁVEZ, J. L.; SHAO, G.; ZHANG, H. Evaluating the sensitivity of water stressed maize chlorophyll and structure based on UAV derived vegetation indices. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 185, p. 1-9, 2021. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106174

ZHAO, Y.; ZHENG, B.; CHAPMAN, S. C.; LAWS, K.; GEORGE-JAEGGLI, B.; HAMMER, G. L.; JORDAN, D. R.; POTGIETER, A. B. Detecting sorghum plant and head features from multispectral UAV imagery. **Plant Phenomics**, v. 2021, p. 1-14, 2021. https://doi.org/10.34133/2021/9874650

CAPÍTULO 12

COMPORTAMENTO DA ENZIMA BETA-GLICOSIDASE EM DIFERENTES AMBIENTES DE PRODUÇÃO NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL

Behavior of Beta-Glucosidase Enzyme in Different Production Environments in the Central Region of Rio Grande do Sul

João Vittor Haefliger Camargo[1]; Antônio Luis Santi[1]; Reyllis Unfer[1]; Renan da Rosa[1]; Gilvan Moisés Bertollo[1]; Gabriel Thiel Prevedello[1]; Nicole Bonini[1]; Willian José Junges[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria – Campus Frederico Westphalen – Departamento de Ciências Agrárias, BR386 Km Linha 7 de Setembro, 98400000, Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul, Brasil,
joao.haefliger@acad.ufsm.br, santi_pratica@yahoo.com, reyllis9@gmail.com, renandarosa1@gmail.com, gilvan.bertollo@ufsm.br, prevadello.gabriel@acad.ufsm.br, nicole.bonini@acad.ufsm.br, willian.junges@acad.ufsm.br.

RESUMO

O aumento da demanda global por alimentos exige a otimização do manejo agrícola, especialmente em culturas como a soja. Este estudo avaliou o comportamento da enzima beta-glicosidase como bioindicador de qualidade do solo em diferentes ambientes de produção na região central do Rio Grande do Sul. Foram analisadas 21 lavouras comerciais de soja, divididas em zonas de alto, médio e baixo potencial produtivo, determinadas por histórico de colheita e índices vegetativos. Amostras de solo (0–15 cm) foram coletadas até 30 dias após a colheita da soja, avaliando atributos químicos, físicos e atividade enzimática. Os resultados indicaram maior atividade de beta-glicosidase em ambientes de alto potencial (343,0 nMol g^{-1} h^{-1}), seguida pelos ambientes de médio (284,0) e baixo potencial produtivo (174,9). Essa maior atividade esteve associada a solos com maiores teores de matéria orgânica, fósforo, zinco e boro, além de melhor estrutura química e física. Conclui-se que a beta-glicosidase é um indicador sensível e confiável da qualidade do solo em sistemas de produção de soja, podendo subsidiar práticas de manejo mais sustentáveis.

Palavras-chave: Sustentabilidade agrícola. Produtividade da soja. Atividade microbiana.

ABSTRACT

The increasing global demand for food requires the optimization of agricultural management, especially for crops such as soybeans. This study evaluated the behavior of the beta-glucosidase enzyme as a bioindicator of soil quality in different production environments in the central region of Rio Grande do Sul, Brazil. Twenty-one commercial soybean fields were analyzed, divided into zones of high, medium, and low yield potential, determined by harvest history and vegetation indices. Soil samples (0–15 cm) were collected up to 30 days after soybean harvest, and chemical, physical, and enzymatic activity attributes were evaluated. Results showed higher beta-glucosidase activity in high-potential environments (343.0 nMol g^{-1} h^{-1}), followed by medium (284.0) and low yield potential environments (174.9). This higher activity was associated with soils containing greater levels of organic matter, phosphorus, zinc, and boron, as well as improved chemical and physical structure. These findings indicate that

beta-glucosidase is a sensitive and reliable indicator of soil quality in soybean production systems and can support more sustainable management practices.

Keywords: Agricultural Sustainability. Soybean productivity. Microbial activity.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a intensificação da demanda global por alimentos impõem à agricultura o desafio de produzir mais em menos área, com menores custos e impactos ambientais (FAO, 2021). Nesse contexto, culturas estratégicas como a soja se destacam pelo protagonismo na segurança alimentar e na cadeia produtiva mundial (Hartman et al., 2022). O aumento da produtividade, entretanto, depende não apenas da expansão da fronteira agrícola, mas da otimização do manejo nas áreas já cultivadas, reduzindo a diferença entre o potencial produtivo e o rendimento efetivamente alcançado (Lopes et al., 2019).

Os ambientes de produção emergem como ferramenta essencial nesse processo, pois permitem ajustar práticas agrícolas às condições específicas do solo, como fertilidade, disponibilidade hídrica e topografia (Amado et al., 2020). Além de ganhos em rendimento, essa abordagem contribui para a sustentabilidade, reduzindo a pressão sobre novos ambientes de cultivo e favorecendo o uso mais eficiente de insumos, em consonância com metas globais de redução de fertilizantes minerais e emissões agrícolas (ONU, 2020; Smith et al., 2021). Nesse sentido, o uso de plantas de cobertura em ambientes limitantes tem se mostrado ferramenta estratégica para aumentar o sequestro de carbono e estimular a atividade enzimática do solo, como destacado por Santi & Gazolla Neto (2025).

Nesse cenário, a qualidade biológica do solo passa a ser reconhecida como fator determinante, complementando atributos físicos e químicos tradicionalmente monitorados. Entre os bioindicadores, destaca-se a atividade enzimática, em especial a beta-glicosidase, que atua na degradação da celulose e na liberação de glicose, fonte primária de energia para a microbiota edáfica, promovendo a mineralização da matéria orgânica e a disponibilização de nutrientes essenciais às plantas (Bastida et al., 2019; Zhao et al., 2021). A atividade dessa enzima, sensível a condições de pH, matéria orgânica e manejo do solo, configura-se como um parâmetro estratégico para avaliação da qualidade do solo e para a implementação de práticas de agricultura de precisão mais eficientes e sustentáveis.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento da enzima beta-glicosidase em diferentes ambientes de produção de soja na região central do Rio Grande do Sul e sua relação com atributos químicos e físicos do solo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo:

Para este estudo, foram selecionadas 21 lavouras comerciais cultivadas com soja na região central do Rio Grande do Sul. Sendo elas: 14 áreas em Cachoeira do Sul, 2 em Pantano Grande, 2 em Rio Pardo, 1 em São Sepé, 1 em Santa Maria e 1 em

Restinga Seca. Esses ambientes de produção representaram 203 talhões distintos e 14.228,10 hectares analisados nos anos de 2021, 2022 e 2023.

2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados:

Após a escolha das áreas foi realizada a delimitação dos ambientes de produção através da sobreposição do histórico de mapas de colheita e leituras dos índices vegetativos NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), NDRE (Índice de Diferença Normalizada do Red Edge) e MSAVI2 (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado), dividindo esses ambientes em três zonas de potencial produtivo de acordo com o desenvolvimento vegetativo histórico das áreas e do histórico produtivo dos mapas de colheita. Através deste método todos os talhões obtiveram a divisão de sua extensão em ambientes de alto, médio e de baixo potencial produtivo.

A partir da definição dos ambientes de produção foram direcionados pontos de coleta de solo, os quais foram direcionados em igual quantidade em cada um dos ambientes de cada talhão. As coletas de solo, a uma profundidade de 0-15 cm, usando uma broca mecânica acoplada a um quadriciclo. A realização das coletas ocorreu em até 30 dias após a colheita da soja.

No laboratório de análise de solo da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), as amostras foram submetidas a análises de macro e micronutrientes, bem como análises de granulometria. A análise enzimática da beta-glicosidase foi realizada pela startup ConnectBio, incubada na UNISC. Os resultados foram expressos em base seca de nMol de nitrofenol liberado em 1g de solo em 1 hora.

Após o recebimento dos dados do laboratório, procedeu-se uma análise das características químicas e físicas de cada ambiente de produção, um estudo sobre a correlação da atividade da beta-glicosidase com os diferentes ambientes buscando compreender como a atividade dessa enzima varia em resposta às condições específicas de cada área e, uma avaliação das correlações entre a atividade da beta-glicosidase e cada atributo do solo individualmente, buscando identificar padrões e relações significativas que possam ratificar o potencial da atividade enzimática da beta-glicosidase como um bioindicador de qualidade do solo.

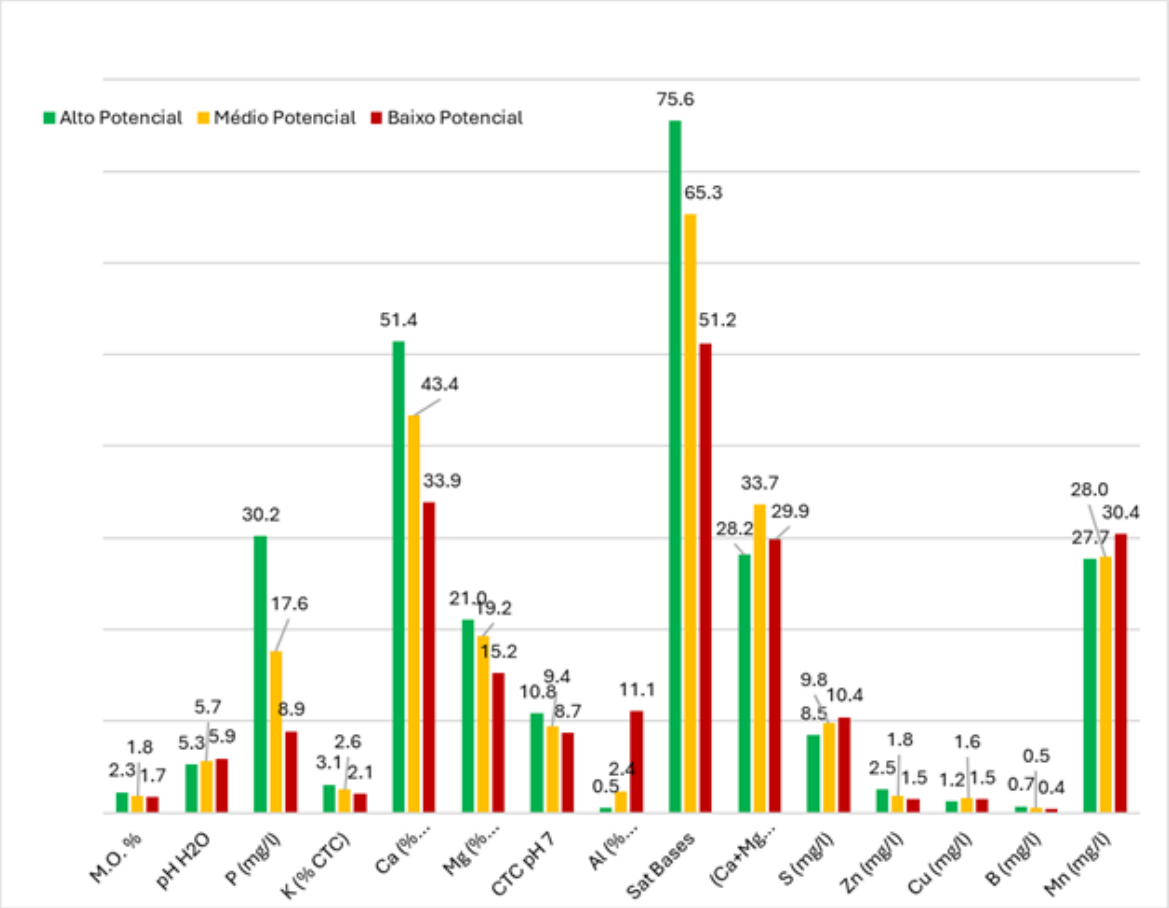
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos ambientes de produção permitiu verificar o comportamento da enzima beta-glicosidase e a caracterização dos atributos químicos (Figura 1) e físicos (Figura 2) do solo. Os ambientes de alto potencial apresentaram melhores condições para o desenvolvimento das plantas, com maiores teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, matéria orgânica e pH mais elevado, além de maior CTC. Já os ambientes de baixo potencial mostraram maior acidez e teores mais altos de alumínio, fator que pode prejudicar o crescimento vegetal.

A matéria orgânica destacou-se como importante indicador de fertilidade, apresentando relação direta com a atividade enzimática. Os nutrientes essenciais (P, K, Ca, Mg e S) variaram significativamente entre os ambientes, com predominância em solos de maior fertilidade. A saturação por bases também foi superior nesses ambientes, refletindo maior capacidade de troca e disponibilidade de nutrientes.

Entre os micronutrientes, apenas enxofre, zinco, cobre, boro e manganês não seguiram o padrão dos ambientes de produção. O enxofre, em especial, apresentou valores menores nos ambientes de alto potencial, possivelmente em função da maior exportação pelas culturas nessas regiões.

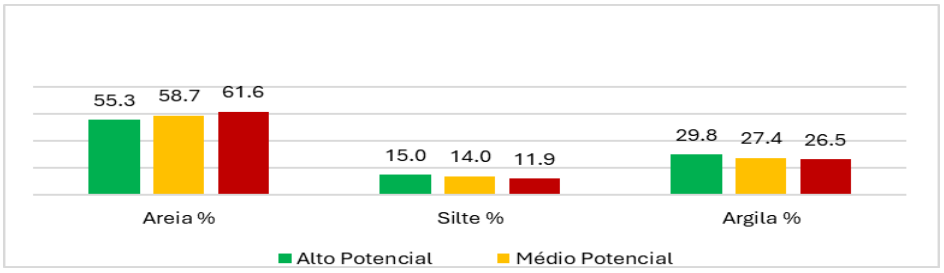
Figura 1: Atributos químicos do solo nos diferentes ambientes de produção.



Fonte: Autores (2025)

Para todos os ambientes de produção também foram realizadas análises físicas, as quais são apresentadas na figura 2 que segue abaixo.

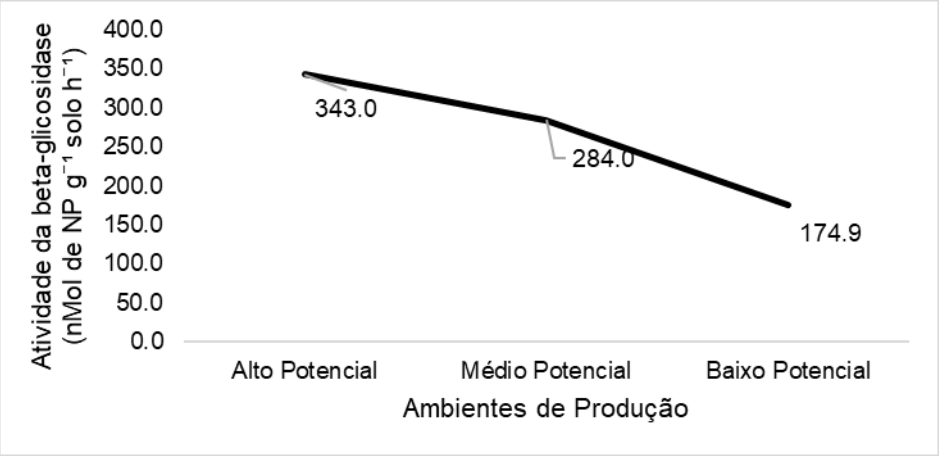
Figura 2: Análise física por granulometria nos diferentes ambientes de produção.



Fonte: Autores (2025)

O terceiro ponto analisado pelo trabalho foi o comportamento da beta-glicosidase em cada ambiente de produção, no qual, constatou-se uma maior resposta enzimática nos ambientes de alto potencial produtivo, conforme a Figura 3 abaixo.

Figura 3: Comportamento da enzima Beta-glicosidase em ambientes de alto, médio e baixo potencial produtivo.



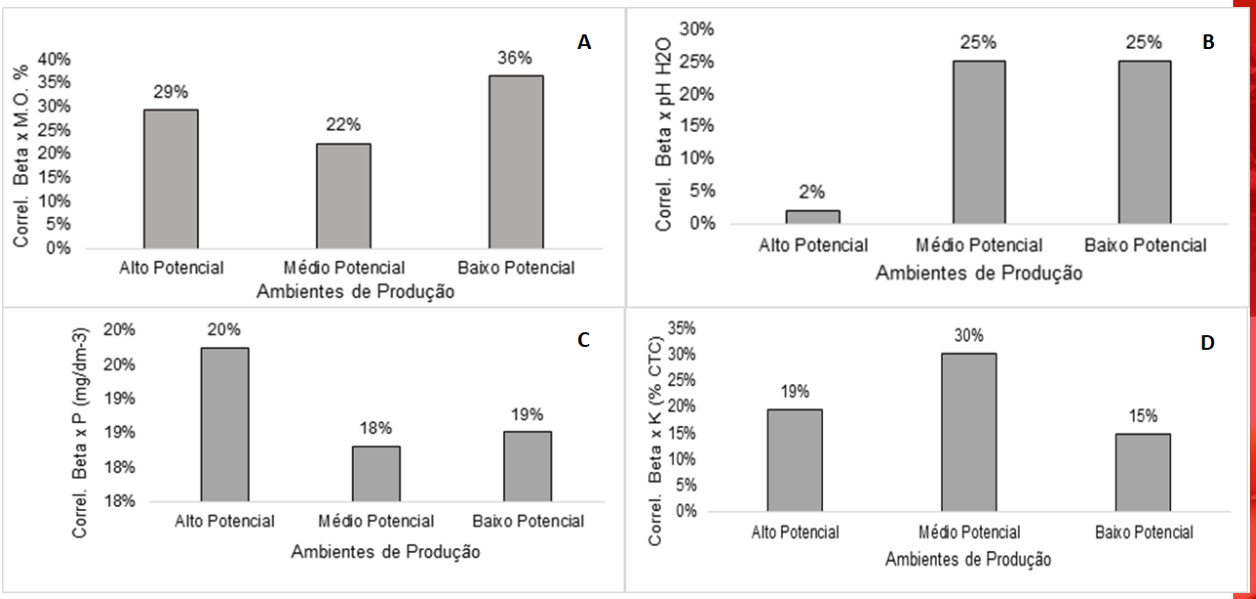
Legenda: Comportamento da enzima Beta-glicosidase em nMol de nitrofenol liberado em 1g de solo em 1 hora.
Fonte: Autores (2025)

A análise dos dados de beta-glicosidase revela que os ambientes com alto potencial produtivo demonstraram a maior atividade de beta-glicosidase, registrando um valor de 343,0, enquanto o ambiente de potencial médio exibe uma atividade intermediária de 284,0 e o ambiente de potencial baixo apresenta a menor atividade de beta-glicosidase, com um valor de 174,9.

Essa variação na atividade da enzima pode ser atribuída ao fato de que a beta-glicosidase desempenha um papel crucial na ciclagem de carbono. Esse processo é potencializado pela adoção de plantas de cobertura, que aumentam a entrada de resíduos orgânicos no solo, favorecendo a matéria orgânica e a microbiota edáfica, como relatado por Santi & Gazolla Neto (2025), onde pode até mesmo catalisar a hidrólise de compostos orgânicos.

Com isso, níveis mais altos de atividade de beta-glicosidase podem indicar uma maior capacidade do solo em decompor matéria orgânica e liberar nutrientes para as plantas, o que está em linha com o maior potencial produtivo observado nesses ambientes. Resultados semelhantes foram reportados por Dick (1997) e Bastida et al. (2019), que destacam a atividade enzimática como um dos principais indicadores da qualidade biológica do solo. Além disso, Zhao et al. (2021) reforçam que a beta-glicosidase está diretamente relacionada à ciclagem do carbono e à disponibilidade de nutrientes, sendo sensível às condições de fertilidade e manejo do solo. Por outro lado, em solos de menor fertilidade, a redução da atividade enzimática limita a decomposição da matéria orgânica e a liberação de nutrientes, conforme também observado por German et al. (2011) em diferentes sistemas agrícolas. Foi observada correlação positiva moderada entre a atividade da beta-glicosidase e o teor de matéria orgânica do solo conforme a figura 4A abaixo.

Figura 4: Correlação entre a atividade da enzima Beta-glicosidase e o teor de matéria orgânica do solo (4A), entre a atividade da enzima Beta-glicosidase e o pH em água do solo (4B), entre os teores da enzima Beta-glicosidase e teores de Fósforo no solo (4C) e entre a atividade da enzima Beta-glicosidase e % de Potássio na CTC pH7 (4D) nos diferentes ambientes de produção.



Fonte: Autores (2025)

Há uma correlação positiva moderada entre o potencial de beta-glicosidase e a matéria orgânica (%) em todos os ambientes de produção. Isso sugere que solos com maiores teores de matéria orgânica tendem a ter uma atividade mais elevada da enzima, independentemente do potencial produtivo do ambiente. A relação entre a atividade da enzima e o pH do solo mostrou comportamentos distintos entre os ambientes de produção (Figura 4B).

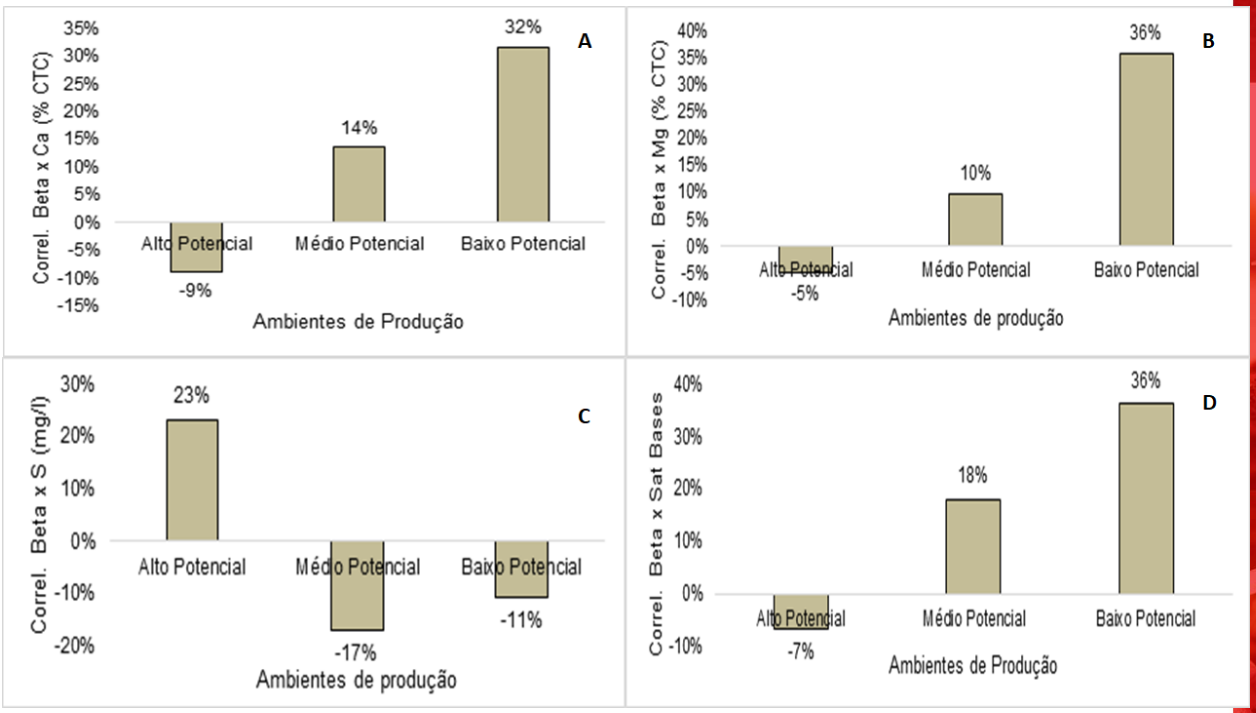
As correlações com o pH do solo variam entre os ambientes de produção. Enquanto nos ambientes de médio e baixo potencial produtivo a correlação é positiva, indicando uma associação entre pH mais ácido e maior atividade enzimática, no ambiente de alto potencial produtivo essa correlação é praticamente neutra. A correlação entre o potencial de beta-glicosidase e o fósforo é positiva em todos os ambientes de produção. Isso sugere que maiores teores de fósforo podem estar associados a uma atividade mais elevada da enzima beta-glicosidase, o que pode promover a decomposição da matéria orgânica e a liberação de nutrientes para as plantas.

O fósforo apresentou correlação positiva com a atividade da beta-glicosidase em todos os ambientes (Figura 4C). No caso do potássio (Figura 4D) observa-se uma positiva entre o potencial de beta-glicosidase e o nutriente no ambiente de médio potencial, enquanto nos outros ambientes essa correlação é neutra. Isso sugere que o potássio pode influenciar de forma mais direta a atividade da enzima em solos com potencial produtivo intermediário.

No caso do cálcio no ambiente de produção de baixo e médio potencial produtivo a correlação é positiva, enquanto no ambiente de alto potencial essa é negativa. Isso vai contra a tendência apresentada anteriormente no potássio. Assim

como o cálcio (Figura 5A), a correlação entre o potencial de beta-glicosidase e o magnésio varia entre os ambientes de produção. Enquanto no ambiente de baixo potencial produtivo essa correlação é positiva, nos outros ambientes ela é neutra ou negativa. Isso sugere que o magnésio pode ter um impacto diferente na atividade da enzima, dependendo das condições do solo e do potencial produtivo da área.

Figura 5: Correlação entre a atividade da enzima Beta-glicosidase e % de Cálcio na CTC pH7 (5A), entre a atividade da enzima Beta-glicosidase e % de Magnésio na CTC pH7 (5B), entre a atividade da enzima Beta-glicosidase e os teores de Enxofre (5C) e entre a atividade da enzima Beta-glicosidase e os valores de Saturação de Bases (5D) nos diferentes ambientes de produção.

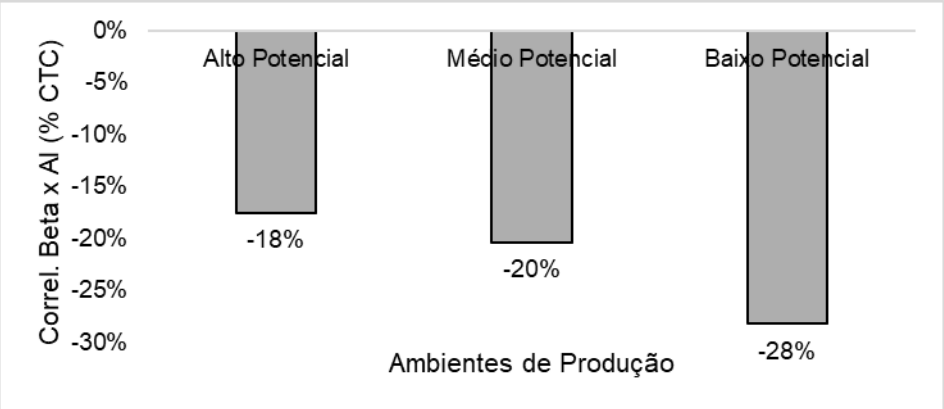


Fonte: Autores (2025)

A correlação com o enxofre (5C) apresenta variações entre os ambientes de produção, com uma correlação positiva para o ambiente de alto potencial produtivo e correlações negativas para os ambientes de médio e baixo potencial produtivo. Ratificando o comportamento da enzima no caso do cálcio e do magnésio, a enzima se comporta no caso da saturação de bases (5D), apresentando um índice de correlação maior em ambientes de baixo potencial, o que demonstra que em um solo com uma alta saturação de bases como é o caso dos ambientes de alto potencial o comportamento da enzima beta-glicosidase é maior por outros fatores.

Observa-se uma correlação negativa entre o potencial de beta-glicosidase e o alumínio (% CTC) apresentada na Figura 6 em todos os ambientes de produção. Isso sugere que maiores teores de alumínio estão associados a uma redução na atividade da enzima beta-glicosidase, o que pode indicar condições menos favoráveis para a decomposição da matéria orgânica e a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Figura 6: Correlação entre a atividade da enzima Beta-glicosidase e % de Alumínio na CTC pH7 nos diferentes ambientes de produção.



Fonte: Autores (2025)

Os resultados da correlação da atividade enzimática com a relação (ca+mg)/k não apresentaram padrões, o que sinaliza que esse atributo de solo não é parâmetro fundamental para a expressão da enzima no solo. A correlação foi positiva e bastante significativa entre o potencial de beta-glicosidase e o teor de zinco em todos os ambientes de produção. Isso pode sinalizar que solos com maiores concentrações de zinco tendem a apresentar uma atividade enzimática mais elevada.

Os dados indicam uma correlação negativa entre o potencial de beta-glicosidase e o teor de cobre (Cu) em todos os ambientes de produção, embora as correlações sejam relativamente baixas. Isso sugere que altas concentrações de cobre podem estar associadas a uma redução na atividade da enzima beta-glicosidase.

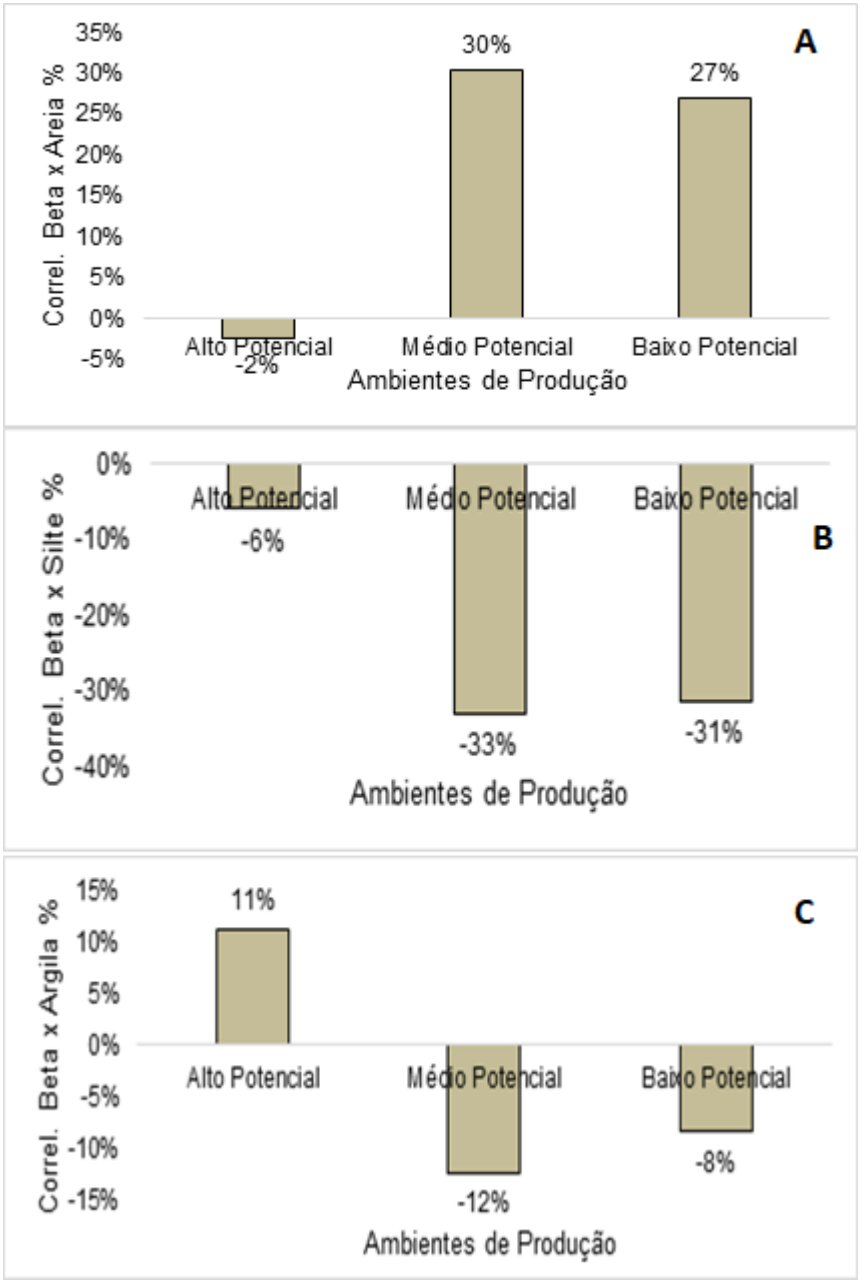
Há uma correlação positiva entre o potencial de beta-glicosidase e o teor de boro em todos os ambientes de produção. Isso sugere que solos com maiores concentrações de boro podem apresentar uma atividade enzimática mais elevada.

Observou-se uma correlação negativa entre o potencial de beta-glicosidase e o teor de manganês (Mn) em todos os ambientes de produção. Isso sugere que maiores concentrações de manganês podem estar associadas a uma redução na atividade da enzima beta-glicosidase.

Os ambientes de produção de médio e baixo potencial produtivo apresentaram uma maior correlação entre a atividade enzimática e o teor de areia no solo (Figura 7A). Isso pode ser advindo do fato de que o teor de areia é maior nessas áreas.

No caso do Silte (Figura 7B) a correlação foi negativa em todos os ambientes de produção, o que indica que o teor de silte isoladamente não explica o comportamento da enzima. Para a argila (Figura 7C) a correlação foi positiva nos ambientes de produção de alto potencial produtivo e negativa para os demais ambientes. Estudos mostram que solos com maior teor de argila tendem a ter uma atividade enzimática mais elevada, o que pode ser atribuído à proteção das enzimas contra fatores adversos, como mudanças bruscas de pH ou ação de radicais livres.

Figura 7: Correlação entre a atividade da enzima Beta-glicosidase e a % de Areia (7A), entre a atividade da enzima Beta-glicosidase e a % de Silte (7B) e entre a atividade da enzima Beta-glicosidase e a % de Argila (7C) nos diferentes ambientes de produção.



Fonte: Autores (2025)

Os resultados mostram que a atividade da beta-glicosidase, foi maior nos ambientes de alto potencial, associada a solos com maior fertilidade (P, K, Ca, Mg, MO, pH mais alto e menor Al). A beta-glicosidase apresentou correlações positivas com matéria orgânica, fósforo, zinco e boro, indicando maior ciclagem de carbono e disponibilidade de nutrientes. Já alumínio, cobre e manganês tiveram efeito negativo, refletindo condições limitantes. A textura também influenciou: a argila protegeu e estabilizou a enzima, enquanto o silte se mostrou desfavorável. Divergências pontuais (como cálcio, magnésio e enxofre) sugerem que, em solos já férteis, outros fatores

passam a regular a enzima. Assim, a beta-glicosidase confirma-se como um bioindicador sensível da qualidade do solo, integrando condições químicas, físicas e de manejo.

4 CONCLUSÃO

A atividade da beta-glicosidase foi maior nos ambientes de alto potencial produtivo, associando-se positivamente à matéria orgânica, fósforo, zinco e boro, e negativamente a alumínio, cobre e manganês. Isso ocorre porque solos mais férteis e equilibrados favorecem a ciclagem de carbono e a mineralização da matéria orgânica, ampliando a disponibilidade de nutrientes essenciais às plantas. A textura também influenciou, com a argila protegendo e estabilizando a enzima contra condições adversas. Assim, a beta-glicosidase confirma-se como um bioindicador sensível e confiável da qualidade do solo, capaz de integrar atributos químicos e físicos e auxiliar na definição de estratégias de agricultura de precisão em sistemas de soja.

REFERÊNCIAS

AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R. Ambientes de produção como ferramenta de manejo em sistemas agrícolas. **Revista Plantio Direto**, v. 170, p. 10-17, 2020.

BASTIDA, F.; MORENO, J. L.; HERNÁNDEZ, T.; GARCÍA, C. Microbiological activity in a soil 15 years after its devegetation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 1, p. 36-43, 2019.

BURNS, R. G. et al. Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 58, p. 216-234, 2013.

DICK, R. P. Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health. In: PANKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R. (org.). **Biological indicators of soil health**. Wallingford: CAB International, 1997. p. 121-156.

FAO. **The state of food and agriculture 2021**: making agrifood systems more resilient to shocks and stresses. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021.

GERMAN, D. P. et al. Optimization of hydrolytic and oxidative enzyme methods for ecosystem studies. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, p. 1387-1397, 2011.

HARTMAN, G. L.; WEST, E. D.; HERMAN, T. K. Crops that feed the world 2. Soybean – worldwide production, use, and constraints caused by pathogens and pests. **Food Security**, v. 3, n. 1, p. 5-17, 2022.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, p. 1-16, 2019.

ISBN 978-65-990392-6-3

ONU. **Transformando nosso mundo:** Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Nova Iorque: Organização das Nações Unidas, 2020.

SANTI, A. L.; GAZOLLA NETO, A. **Plantas de cobertura e ambientes limitantes: inovação no manejo de espécies, carbono e plantio**. Ijuí: Editora Unijuí, 2025.

SINSABAUGH, R. L.; HILL, B. H.; FOLLSTAD SHAH, J. J. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment. **Nature**, v. 472, p. 476-479, 2013.

SMITH, P. et al. How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. **Global Change Biology**, v. 27, p. 151-166, 2021.

TABATABAI, M. A.; DICK, W. A. Enzymes in soil: research and developments in measuring activities. In: BURNS, R. G.; DICK, R. P. (org.). **Enzymes in the environment: activity, ecology and applications**. New York: Marcel Dekker, 2002. p.567-596.

THOMPSON, L. M.; TROEH, F. R. **Soils and soil fertility**. 5. ed. New York: Oxford University Press, 1993.

WITT, C.; PASUQUIN, J. M.; LADHA, J. K. Dynamics of indigenous nitrogen supply in intensive irrigated rice systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 57, p. 191-201, 2000.

ZHAO, J. et al. Responses of soil microbial community, enzyme activities and nutrients to crop rotation following application of bio-organic fertilizer. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 152, 108067, 2021.

CAPÍTULO 13

VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA ATIVIDADE ENZIMÁTICA DA FOSFATASE ÁCIDA EM LATOSSOLO VERMELHO

Spatial and Temporal Variability of Acid Phosphatase Enzymatic Activity in a Red Latosol Under

Amanda Fornari[1]; Antônio Luis Santi[1]; Guilherme Rechden Lobato[1]; Renan da Rosa[1]; Julio Gustavo Buchholz[1]; André Felipe de Conti[1]; Vitor Eduardo Schardong[1]; Murilo Santi Trentin[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria – Campus Frederico Westphalen – Departamento de Ciências Agrárias, BR386 Km Linha 7 de Setembro, 98400000, Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul, Brasil, amanda.fornari@acad.ufsm.br, santi.pratica@yahoo.com, lobato.guilherme@gmail.com, renandarosa1@gmail.com, , julio.buchholz@acad.ufsm.br, decontiagro@gmail.com, schardong.vitor@acad.ufsm.br, murilo.trentin@acad.ufsm.br.

RESUMO

O solo é essencial para a produção de alimentos, fornecendo nutrientes vitais a plantas, animais e seres humanos. Sua conservação é fundamental para a sustentabilidade agrícola, especialmente diante do aumento populacional e da escassez de recursos. A saúde do solo pode ser avaliada por indicadores biológicos, como a atividade da fosfatase ácida, enzima sensível a variações ambientais e de manejo. Este estudo, realizado em Cruz Alta – RS, analisou a atividade dessa enzima em áreas sob plantio direto, utilizando geoestatística. Em maio de 2021, o desvio padrão foi de 176,6561 µg p-nitrophenol g soil^{-1} h^{-1}, superior ao de dezembro (137,4682 µg), e o CV% de 47,06 contra 35,49. O modelo Gaussiano ajustou-se melhor aos semivariogramas, com alcances de 28,3 m no inverno e 16,6 m no verão. Os coeficientes de determinação foram satisfatórios (R^2 = 0,745 e 0,756). A maior variabilidade em maio indica influência de fatores sazonais. Os resultados destacam a importância de estudos contínuos para práticas agrícolas sustentáveis.

Palavras-chave: Saúde do solo. Atividade enzimática. Agricultura de precisão.

ABSTRACT

Soil is essential for food production, providing vital nutrients to plants, animals, and humans. Its conservation is fundamental for agricultural sustainability, especially in the face of population growth and resource scarcity. Soil health can be assessed through biological indicators, such as the activity of acid phosphatase, an enzyme sensitive to environmental and management variations. This study, conducted in Cruz Alta – RS, analyzed the activity of this enzyme in no-till areas using geostatistics. In May 2021, the standard deviation was 176.6561 µg p-nitrophenol g soil^{-1} h^{-1}, higher than in December (137.4682 µg), with a CV% of 47.06 compared to 35.49. The Gaussian model best fitted the semivariograms, with ranges of 28.3 m in winter and 16.6 m in summer. The coefficients of determination were satisfactory (R^2 = 0.745 and 0.756). The greater variability in May indicates the influence of seasonal factors. The results highlight the importance of continuous studies for sustainable agricultural practices.

Keywords: Soil health. enzymatic activity. Precision agriculture.

1 INTRODUÇÃO

O solo representa o alicerce fundamental para a produção de quase todos os alimentos consumidos globalmente. Como principal fonte de nutrientes, ele desempenha um papel central na produção de alimentos, não apenas para seres humanos, mas também para animais (WEIL et al., 2017). O setor agrícola, atualmente, enfrenta pressões devido ao aumento populacional, limitações nos recursos naturais e desafios sociais. A promoção da saúde do solo se apresenta como uma solução potencial, pois um solo saudável é mais do que apenas um meio inerte; ele é um ecossistema vibrante, repleto de vida. A presença de ar e água de boa qualidade é indispensável para manter uma rica biodiversidade de microrganismos, os quais, por sua vez, sustentam a produtividade agrícola (TILMAN et al., 2002).

A avaliação da saúde do solo frequentemente se apoia em vários indicadores biológicos. Entre eles, destacam-se os relacionados à atividade microbiana, como o carbono orgânico total, a biomassa microbiana, a respiração basal e a atividade de enzimas específicas (JOHNSTON et al., 2009).

Enzimas são biomoléculas essenciais que desempenham funções cruciais no solo, acelerando significativamente reações bioquímicas, a produção destas enzimas é primariamente realizada por microrganismos no solo, e a presença de vegetação, em especial na rizosfera, amplifica a atividade enzimática (DICK, 1994).

A atividade enzimática, por exemplo, reflete diretamente os processos metabólicos microbianos cruciais para os ciclos de nutrientes do solo (NANNIPIERI ET AL. 2002). Uma das enzimas frequentemente estudadas é a fosfatase ácida, responsável por catalisar a hidrólise de ésteres de fosfato em ambientes ácidos, crucial para inúmeros processos metabólicos (ANDERSON, G 2015).

Esta enzima é fundamental no ciclo do fósforo, desempenhando um papel importante na mineralização de fósforo orgânico no solo (LOPES et al., 2010). Como resultado de sua atividade, a Fosfatase Ácida libera fósforo inorgânico que fica disponível para as plantas, promovendo assim o crescimento saudável das mesmas (MENDES, 2012). Dada a crucial necessidade de fósforo para as plantas, a atividade da Fosfatase Ácida desempenha um papel chave, sinalizando a saúde e fertilidade do solo. Esta enzima é frequentemente vista como um indicador robusto da habilidade do solo de prover fósforo para as plantas (TABATABAI, 1994).

No âmbito agronômico, a relação entre a atividade enzimática e a qualidade do solo tem sido sugeridas como potenciais da saúde do solo (VAN BRUGGEN, et al 2000; BORASE et al., 2020). Variações na atividade enzimática, decorrentes de diferentes práticas de manejo agrícola, reiteram o papel das enzimas como bioindicadores da qualidade do solo (MENDES, et al. 2015).

A agricultura de precisão exige um entendimento meticuloso da atividade enzimática e de sua variabilidade. Esse foco se torna ainda mais premente em solos sob sistema de plantio direto, onde o manejo afeta diretamente os indicadores biológicos. Devido à natureza intrinsecamente variável do solo, métodos avançados, como a geoestatística, são essenciais para decifrar e mapear essa heterogeneidade, auxiliando assim nas tomadas de decisões de manejo (WEBSTER & OLIVER, 2007).

Considerando que a variabilidade biológica do solo é um fator chave, este estudo tem como hipótese que bioindicadores, como as enzimas, variam em função das práticas de manejo e das épocas específicas. A pesquisa busca, portanto, analisar

ISBN 978-65-990392-6-3

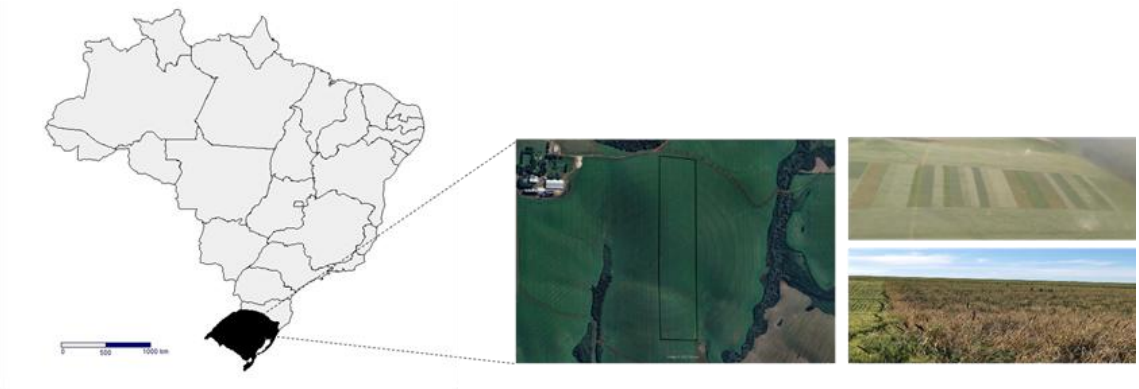
a atividade da fosfatase ácida em solo sob plantio direto para fornecer informações valiosas à agricultura de precisão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido no município de Cruz Alta, Rio Grande do Sul, Brasil, em área comercial da empresa Sementes Aurora, totalizando aproximadamente 18,2 hectares. A localização geográfica da área experimental corresponde à latitude 28°45'53.96"S e longitude 53°35'9.58"W, com altitude média de 410 metros (Figura 1). O relevo é suavemente ondulado e o solo classificado como Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa (RODRIGUES & VITAL, 2016).

Figura 1 – Área experimental, Cruz Alta, RS

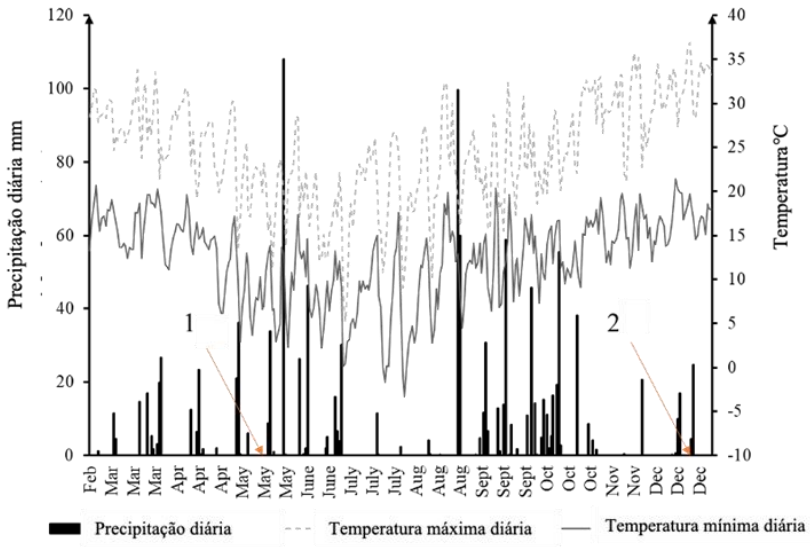


Fonte: Autores.

O município de Cruz Alta, RS, apresenta estações de verão e inverno bem definidas, com chuvas distribuídas durante o ano, sem uma estação seca marcante (KUINCHTNER & BURIOL, 2001). A cidade tem clima Cfa, segundo a classificação de Köppen. As temperaturas médias variam de -3°C a 18°C no inverno e superam 22°C no verão (SANTOS et al., 2015).

O solo da região é um Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa e topografia suavemente ondulada (RODRIGUES & VITAL, 2016). A área de estudo possui um sistema de irrigação por pivô central. Os dados meteorológicos de fevereiro a dezembro de 2021 foram coletados da estação A853 do INMET (Figura 2).

Figura 2 – Informação Meteorológica, Cruz Alta, RS.

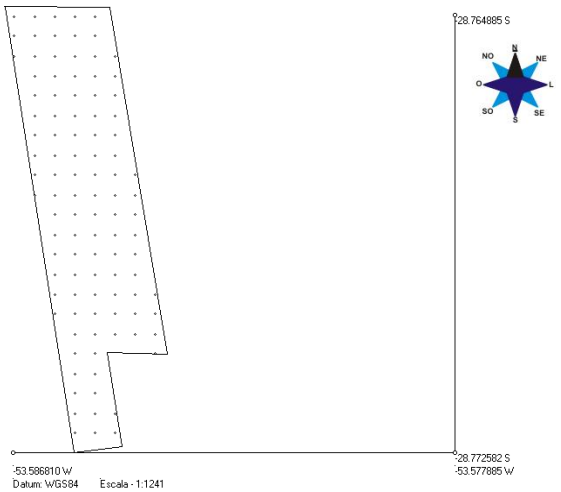


Legenda: 1: Data da coleta realizada em maio de 2021 (Inverno); 2: Data de coleta realizada em dezembro de 2021 (verão).
Fonte: Autores 2023 adaptado INMET.

2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados

As coletas de amostras do solo ocorreram em duas fases: a primeira no pico da estação úmida, em 27 de maio de 2021, e a segunda, após 45 dias da colheita do trigo, em 22 de dezembro de 2021, coincidindo com a estação seca (LOPES & SILVA, 2019). As amostras foram retiradas na profundidade de 0 a 0,15m e, para cada ponto de coleta, oito subamostras foram combinadas, em um total de 103 pontos amostrais. Os locais de coleta foram determinados com base em uma grade regular e georreferenciados (Figura 3).

Figura 3 – Grade amostral com os pontos de coleta.



Fonte: Autores 2025

ISBN 978-65-990392-6-3

De acordo com os resultados obtidos referentes aos atributos físico-químicos do solo Tabela 1), é possível inferir características determinantes sobre sua composição e qualidade. O teor de argila encontrado, equivalente a 44,3%, classifica-se como solo de textura argilosa. O valor do pH, avaliado em água, foi de 6,1, classificado como solo levemente ácido. A quantidade de matéria orgânica (MO) foi determinada em 2,9%. Paralelamente, os teores de fósforo (P) e potássio (K) registraram-se em 19,2 e 160,2 respectivamente. Os cátions, elementos essenciais na dinâmica do solo, apresentaram os seguintes valores: cálcio (Ca) em 5,7, magnésio (Mg) em 2,4 e enxofre (S) em 20,5. O valor de saturação por bases (V%), um indicador fundamental da qualidade química do solo, alcançou 75%, enquanto a capacidade de troca catiônica (CTC) foi registrada em 11,1.

Tabela 1 - Média Físico-química dos Atributos do solo (profundidade 0,00 – 0,15m).

	Atributos Físico-Químico do Solo (*)									
	Argila (%)	pH (água)	MO (%)	P	K	Ca	Mg	S	V(%)	CTC
Média	44.3	6.1	2.9	19.2	160.2	5.7	2.4	20.5	75	11.1

Legenda: pH (Potencial Hidrogeniônico); P (fósforo (mg dm-3)); K (potássio (mg dm-3)); Ca (cálcio (cmolc dm-3)); Mg (magnésio (cmolc dm-3)); MO (matéria orgânica); V (saturação por bases); S (enxofre (mg dm-3)); CTC (capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (cmolc dm-3)).
Fonte: Autores (2023)

As amostras foram encaminhadas ao laboratório Central Analítica em Santa Cruz do Sul, RS, para análise física e química (MARTINS et al., 2008). Os testes enzimáticos, focando na fosfatase ácida, foram realizados no laboratório ConnectBio, também localizado em Santa Cruz do Sul. A metodologia empregada por este laboratório baseia-se na adaptação do método descrito por Tabatabai (1994).

A avaliação dos dados deste estudo foi conduzida por meio de uma análise exploratória e estatística descritiva, visando identificar a centralidade e dispersão dos dados. A normalidade dos dados foi examinada usando o teste Shapiro-Wilk (W) a $p < 0,05$, conforme proposto por SHAPIRO e WILK (1965). Para a análise dos dados, foi utilizado o software Stata/SE 17.0. Foi realizada a correlação de Pearson como método estatístico na qual é uma medida estatística que indica a intensidade e direção da relação linear entre duas variáveis quantitativas contínuas. Na agricultura, essa correlação é frequentemente utilizada para investigar as relações entre diferentes variáveis do solo e a produtividade das plantas, incluindo a atividade de enzimas como a fosfatase ácida, que desempenha um papel fundamental na mobilização do fósforo no solo (NANNIPIERI et al., 2011).

A análise geoestatística foi realizada utilizando semivariogramas experimentais descritos por Vieira (2002), seguindo os modelos teóricos (esférico, exponencial, gaussiano e linear) que melhor se ajustaram à variável, utilizando o programa de computador Gamma Design Software - GS+ (Robertson, 1998). Os modelos foram

ISBN 978-65-990392-6-3

ajustados com base no melhor coeficiente de determinação (r^2), bem como na análise de validação cruzada (valores observados versus estimados). A partir do ajuste de um modelo matemático dos dados, os seguintes parâmetros foram definidos: efeito pepita (C0), limiar (C0+C) e alcance (A). Após a análise e ajuste dos semivariogramas, a interpolação foi realizada por krigagem ordinária, levando em conta os parâmetros do semivariograma (modelo ajustado, efeito pepita, alcance e limiar) determinados pela análise geoestatística, utilizando o programa de computador Gamma Design Software - GS+ (Robertson, 1998).

A distribuição espacial das variáveis estudadas é apresentada em mapas de isolinhas. Os mapas foram elaborados em cinco camadas, subdivididas em intervalos de 0 a 200, 200 a 300, 300 a 400, 400 a 500, 500 a 850 e valores até 850 µg p-nitrofenol g solo-1 h-1.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise exploratória da atividade da enzima fosfatase ácida evidenciam flutuações entre os meses analisados (Quadro 1), possivelmente refletindo a característica sazonal intrínseca do ecossistema do solo (SMITH et al., 2015). A influência da temperatura no comportamento dos micro-organismos do solo é um fator a ser considerado nestas análises (FERREIRA E SOARES 2019).

Quadro 1 - Análise descritiva da Enzima Fosfatase Ácida

Estatística Descritiva	Maio	Dezembro
Média	375.3634	387.3354
Desvio Padrão (SD)	176.6561	137.4682
Erro Padrão da Média (se)	17.15836	13.35209
Mínimo (Min)	116.1569	164.9552
Mediana (p50)	332.1251	374.2928
Máximo (Max)	1103.838	786.8548
CV%	47.06	35.49
Amplitude	987.681	621.8996
Assimetria	1.292852	0.7700704
Curtose	5.1585	3.2784
W	0.90769	0.95207
N	105	105

Legenda: n: número de observações; CV: coeficiente de variação; SW: Shapiro-Wilk. Valores expressos em µg p-nitrofenol g solo-1 h-1. * Valores significativos a nulidade da normalidade.
Fonte: Autores (2023) Stata V17

Na coleta de inverno, as temperaturas máximas, que variaram de 21,4°C a 33,8°C nos 15 dias anteriores à coleta, podem ter levado aos valores mais baixos observados para a atividade da fosfatase ácida, corroborando as observações de Almeida et al. (2017). Em contrapartida, dezembro, já caracterizado pelas condições de verão, registrou uma faixa de temperatura entre 27,3°C e 36,9°C, podendo justificar

a elevação na atividade enzimática mínima de fosfatase acida conforme indicado por Santos e Oliveira (2020).

No que se refere à variabilidade dos dados, maio apresentou um desvio padrão de 176.6561 µg p-nitrophenol g soil-1 h-1, o que indica maior dispersão dos dados em relação à média se comparado ao desvio padrão de dezembro, 137.4682 µg p-nitrophenol g soil-1 h-1. Esse padrão sugere que em maio, fatores adicionais, como práticas agrícolas ou fenômenos meteorológicos, podem ter influenciado o comportamento da enzima (Johnson & Hoverstad, 2017).

Na coleta de dezembro, nota-se um coeficiente de variação (CV%) de 35.49, enquanto em maio o CV% foi de 47.06. Esta diferença na dispersão em relação à média, pode indicar alterações na estabilidade do sistema, conforme discutido por Garcia et al. (2020).

Considerando os coeficientes de variação apresentados, de acordo com a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980), pode-se categorizar a variabilidade do CV% para ambas as coletas como moderada. Nesta classificação, os dados são divididos em baixa variabilidade (CV <12%), variabilidade moderada (12%< CV <60%) e alta variabilidade (CV >60%). Ambos os valores de CV% observados neste estudo se enquadram na faixa de variabilidade moderada.

Os indicativos de assimetria, curtose e o valor W de Shapiro-Wilk demonstram que os dados não aderem perfeitamente a uma distribuição normal (LIMA et al., 2019). O mês de maio, com seu teste W de 0.90769, não atinge o limite tradicional de aceitação de normalidade (0.95), sinalizando a necessidade de um exame mais detalhado, que pode incluir transformações nos dados ou até o emprego de análises não paramétricas, principalmente para testes de comparação de média (MARTINEZ & MARTINEZ, 2014). A despeito da desejabilidade de uma distribuição normal dos dados, não é essencial para técnicas como a krigagem na espacialização, conforme destacado por Cressie (1992) e Oliveira et al. (2015). A despeito da desejabilidade de uma distribuição normal dos dados, não é essencial para técnicas como a krigagem na espacialização, conforme destacado por Cressie (1992) e Oliveira et al. (2015).

Analisando os resultados obtidos neste estudo em relação à atividade da fosfatase ácida, é evidente a influência das condições ambientais e sazonais sobre a dinâmica dessa enzima no solo. A comparação com o estudo conduzido por J.Z. BARBOSA et al. (2023) revela que a fosfatase ácida tem comportamentos distintos em diferentes biomas do Brasil. No Bioma Pampa, os valores encontrados por J.Z BARBOSA et al. (2023) mostraram médias menores em comparação às médias registradas em nosso estudo.

Os resultados corroboram estudos anteriores que apontam alta sensibilidade da fosfatase ácida a práticas de manejo e condições ambientais (BARBOSA et al., 2023; CONTE et al., 2002). A variabilidade espacial moderada encontrada em ambas as épocas reforça a necessidade de monitoramento contínuo e de estratégias de manejo localizado, pois mesmo em áreas manejadas sob SPD consolidado há heterogeneidade significativa nas condições químicas e biológicas do solo (MACHADO et al., 2017). Analisando a correlação observa-se que ocorre uma correlação baixa nos diferentes períodos de amostragem, com um coeficiente de correlação de 0.0763 entre a fosfatase ácida no inverno e no verão. Este padrão de correlação entre enzimas em diferentes épocas de coleta foi também evidenciado por Silva et al. (2018) e corroborado por Ferreira e Soares (2020), indicando a complexidade das interações enzimáticas em relação às variações sazonais.

Para os parâmetros da análise de semivariograma (Tabela 2), o modelo ajustado para Fosfatase ácida em ambas as coletas foi gaussiano. A amplitude dos modelos ajustados para cada atividade enzimática variou em um raio de 28,3 metros a 16,6 metros de cada ponto.

Em relação ao coeficiente de determinação da regressão (R^2), encontrou-se um valor médio de 0,745 para a atividade enzimática da fosfatase ácida na estação do inverno e valor mais elevado, 0,756, para a atividade enzimática da fosfatase ácida na estação do verão, ambos considerados satisfatórios para uma análise geoestatística de estimativa de dados em locais não amostrados.

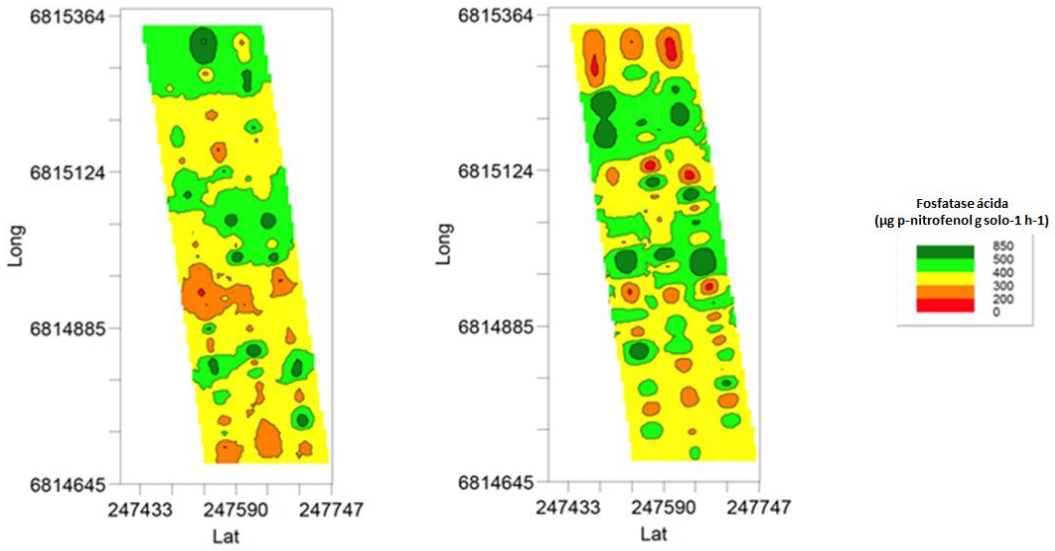
Tabela 2 – Análise dos Parâmetros do Semivariograma da Enzima Fosfatase Ácida

Enzima	Model	C0	C0+C1	A (m)	r²
Fosfatase Acida Inverno	Gaussiano	3740	20960	28.30	0,745
Fosfatase Acida Verão	Gaussiano	10000	18900	16,60	0,756

Legenda: C0: efeito pepita; C0+C1: patamar; A: alcance (metros); r²: coeficiente de determinação.
Fonte: Autores (2023)

Ao observar os mapas temáticos (Figura 4), é possível perceber a variabilidade da atividade enzimática na área, tanto espacial quanto temporalmente. Para a fosfatase ácida na estação de inverno, grande parte da área apresenta valores na faixa de 300 a 400 µg p-nitrofenol g solo-1 h-1. Já na coleta de verão, a fosfatase ácida mostra uma intensidade maior com menor dispersão dos dados, destacando-se valores elevados de até 850 µg p-nitrofenol g solo-1 h-1.

Figura 4 – Mapas de isolinhas representado a variabilidade espacial e temporal da atividade enzimática de fosfatase ácida no solo sob Sistema Plantio Direto



Fonte: Autores (2023)

ISBN 978-65-990392-6-3

Analisando os mapas nas duas diferentes épocas nota-se uma inversão na atividade enzimáticas entre os dois períodos. No período de Outono pontos com maior atividade enzimática, inverteram a sua atividade no período de verão. O mesmo ocorre com os pontos de menor atividade e que no verão se apresentam com maior atividade.

A utilização de plantas de cobertura é amplamente reconhecida como uma estratégia eficiente para aumentar a produtividade agrícola. Além de melhorar as propriedades físicas do solo, essas espécies contribuem para o controle de plantas daninhas e para a criação de um
ambiente biológico mais saudável. Entre os indicadores biológicos utilizados para avaliar a qualidade do solo, destaca-se a atividade enzimática, cuja variação está intimamente relacionada às características químicas do solo, às práticas de manejo e, de forma marcante, ao período de realização das análises.

Os resultados deste estudo confirmam que a atividade da fosfatase ácida apresenta variações tanto espaciais quanto temporais, reforçando a necessidade de compreender melhor as interações entre o manejo agrícola e os processos biológicos do solo, considerando as influências sazonais. Assim, esta pesquisa enfatiza a importância de alinhar as práticas de manejo ao entendimento das dinâmicas enzimáticas, evidenciando que a agricultura sustentável depende do equilíbrio entre práticas agrícolas eficientes e a manutenção da saúde biológica do solo.

4 CONCLUSÃO

A atividade da fosfatase ácida, neste estudo exploratório, apresentou variabilidade espacial e temporal significativa, influenciada por fatores como época de amostragem, condições ambientais e práticas de manejo adotadas. A baixa correlação entre as épocas de avaliação indica que o momento da coleta exerce papel determinante nos resultados, reforçando a necessidade de mais estudos para identificar o período mais adequado para análise dessa enzima.

Diante dessa variabilidade, destaca-se a importância de estabelecer critérios uniformes para o período de coleta, frequência de amostragem e condicionantes ambientais, visando ao refinamento na determinação da atividade enzimática em diferentes cenários. Protocolos padronizados devem contemplar aspectos como profundidade de coleta, equipamentos utilizados e técnicas de preservação das amostras, garantindo maior confiabilidade e reprodutibilidade dos dados.

Além disso, a adoção de tecnologias de monitoramento em tempo real pode permitir avaliações mais frequentes, proporcionando uma compreensão mais aprofundada das dinâmicas enzimáticas no solo. O desenvolvimento de estudos colaborativos inter-regionais também é recomendado, pois possibilita integrar dados de diferentes condições edafoclimáticas, resultando em um panorama mais abrangente e consistente da atividade da fosfatase ácida em sistemas agrícolas sob variados manejos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. A.; SILVA, J. F.; SOUZA, E. R. Efeito da aplicação de resíduos de biomassa na atividade enzimática do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, n. 2, p. 423-432, 2017.

ALVES, L. A. et al. Soil acidification and P, K, Ca and Mg budget as affected by sheep grazing and crop rotation in a long-term integrated crop-livestock system in southern Brazil. **Geoderma**, v. 351, p. 197-208, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104678.

ANDERSON, G. Soil enzymes: their role in soil health and sustainability. In: **Soil biology and biochemistry in a changing world: advances in soil biology**. Springer, 2015. p.123-154.

BORASE, S. P.; SHARMA, S. K.; KUMAR, S. Soil enzymes as indicators of soil health and sustainability: a review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 2, p. 351-372, 2020. DOI: 10.1007/s42723-020-00158-3.

CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial** *data*. New York: Wiley, 1992.

DICK, R. P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Ed**.). Defining soil quality for a sustainable** *environment*. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p.107-124. DOI: 10.2136/sssaspecpub35.c7.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Potential uses of soil enzymes. In: METTING, F. B. (Ed.). **Soil microbial ecology: applications in agricultural and environmental management.** New York: Marcel Dekker, 1992. p.95-127.

DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. **Defining soil quality for a sustainable environment. Defining and assessing soil quality.** Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 1-21. DOI: 10.2136/sssaspecpub35.c1.

DORAN, J. W.; SARRANTONIO, M.; LIEBIG, M. A. **Soil health and sustainability. Advances in Agronomy**, v. 56, p. 1-54, 1996. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)60178-9.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. **Phosphatases in soils. Soil Biology and Biochemistry**, v. 9, n. 3, p. 167-172, 1977. DOI: 10.1016/0038-0717(77)90070-0.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2013. 353 p. Disponível em: http://livimagens.sct.embrapa.br/amostras/00053080.pdf.

FERREIRA, M. A.; SOARES, P. R. Variabilidade espacial e temporal da atividade enzimática do solo em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v. 44, n. 4, p. 1067-1076, 2020.

GARCIA, F. F.; SOUZA, P. C.; COSTA, F. F.; MENDES, F. M. Variabilidade espacial da atividade da enzima fosfatase ácida em solos de diferentes classes texturais**. Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, n. 4, p. 1057-1066, 2020.

ISBN 978-65-990392-6-3

JOHNSON, D. L.; HOVERSTAD, T. S. Soil enzyme activity and soil health. In: NANNIPIERI, P.; TABATABAI, A. M.; FERRERA, E. L. (Ed.). **Soil enzymology: applications in agricultural and environmental sciences**. 2. ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2017. p.29-50.

JOHNSTON, A. E.; MEISINGER, J. J.; THOMAS, G. W. **Methods for assessing soil health**. Boca Raton: CRC Press, 2009.

KUINCHTNER, A. C.; BURIOL, G. L. Características climáticas do município de Cruz Alta, RS. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p. 1-11, 2001.

LIMA, A. F.; SANTOS, G. A.; COSTA, F. F. Avaliação da qualidade do solo por meio de indicadores químicos e enzimáticos em áreas de cultivo de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, n. 4, p. 1135-1144, 2019.

LOPES, F. C. F. et al. Enzimas indicadoras da qualidade do solo: uma revisão. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 62, n. 4, p. 883-888, 2010.

MACHADO, R. C. et al. Variabilidade espacial da atividade enzimática do solo em sistemas de produção agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, n. 3, p. 1077-1086, 2017.

MARTINEZ, M. L.; MARTINEZ, M. E. **Estatística básica para as ciências agrárias**. Porto Alegre: Artmed, 2014.

MARTINS, L. A.; SILVA, G. S.; SOUZA, J. C.; GARCIA, R. C. Caracterização química e física de um Latossolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 1357-1366, 2008.

MENDES, I. C.; SOARES, J. C.; SILVA, P. M. Variabilidade espacial da atividade enzimática do solo em sistemas de produção agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 5, p. 1319-1328, 2015. DOI: 10.1590/1806-9657rbcs20140272.

NANNIPIERI, P. et al. Soil enzymes: properties and applications. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 34, n. 12, p. 1505-1523, 2002.

NANNIPIERI, P. et al. Role of phosphatase enzymes in soil. In: BÜNEMANN, E. K. et al. (Ed.). **Phosphorus in action: biological processes in soil phosphorus cycling**. Berlin: Springer, 2011. p. 215-243.

OLIVEIRA, R. L.; LOPES, L. C.; SILVA, G. S.; SCHERER, C. R. Variabilidade espacial da atividade da enzima fosfatase ácida em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 459-467, 2015.

ROBERTSON, G. P. **Geostatistics**. New York: Springer-Verlag, 1998.

RODRIGUES, A. P.; VITAL, B. A. Caracterização do solo de um Latossolo Vermelho distrófico no município de Cruz Alta, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, n. 2, p. 373-383, 2016.

SANTOS, G. M. et al. Climatologia do Rio Grande do Sul: uma análise espacial. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 10, n. 2, p. 203-224, 2015.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, 1965.

SILVA, T. A.; SANTOS, E. S.; OLIVEIRA, R. L. Variabilidade espacial da atividade enzimática do solo em um Latossolo Vermelho-Amarelo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, n. 2, p. 307-316, 2018.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGLE, J. S.; BOTTOMLEY, P. S. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 2 – microbiological and biochemical properties**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 775-833.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics.** New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. ***Geostatistics for environmental scientists***. 2. ed. Chichester: Wiley, 2007.

WEIL, R. R.; BRADY, N. C. ***The nature and properties of soils***. 15. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2017.

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque (RS) · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 14

DETERMINAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE BIOINDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS DE MANEJO DE INVERNO NO SUL DO BRASIL

Determination and Spatial Distribution of Soil Quality Bioindicators in Winter Management Systems in Southern Brazil

Willian José Junges[1]; Antônio Luis Santi[1]; Diego Armando Amaro da Silva [1]; Renan da Rosa[1]; Gilvan Moisés Bertollo[1]; Amanda Fornari[1]; Nicole Bonini[1], Henrique Onofre Cerbaro[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria – Campus Frederico Westphalen – Departamento de Ciências Agrárias, BR386 Km Linha 7 de Setembro, 98400000, Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul, Brasil, willian.junges@acad.ufsm.br, santi.pratica@yahoo.com, damaro.agro@gmail.com , renandarosa1@gmail.com, gilvan.bertollo@ufsm.br, amanda.fornari@acad.ufsm.br, nicole.bonini@acad.ufsm.br , henrique.cerbaro@acad.ufsm.br

RESUMO

O estudo avaliou a distribuição espacial da fauna edáfica em diferentes sistemas de manejo de inverno sob plantio direto no sul do Brasil, utilizando ferramentas de agricultura de precisão. Foram analisados dez sistemas, medindo produção de matéria seca, biomassa e diversidade da fauna do solo, atributos químicos e índices de diversidade. Os sistemas com aveia preta (Ap), azevém (AZ) e o consórcio ApNF apresentaram maior diversidade e qualidade do solo, enquanto o pousio invernal (PO) indicou degradação. A ordem *Oligochaeta* foi associada a ambientes de alta qualidade edáfica, e *Hymenoptera,* à degradação. Os atributos químicos tiveram pouca influência direta sobre a fauna, e a espacialização georreferenciada permitiu identificar áreas e variáveis críticas para o manejo sustentável.

Palavras-chave: Bioindicadores. Fauna do solo. Agricultura de precisão.

ABSTRACT

This study evaluated the spatial distribution of soil fauna in different winter management systems under no-tillage in southern Brazil, using precision agriculture tools. Ten systems were assessed, measuring dry matter yield, soil fauna biomass and diversity, chemical attributes, and diversity indices. Black oat (Ap), ryegrass (AZ), and the ApNF consortium showed higher diversity and soil quality, while winter fallow (PO) indicated degradation. The Oligochaeta order was associated with high soil quality environments, whereas Hymenoptera indicated degradation. Soil chemical attributes had little direct influence on fauna, and georeferenced spatialization allowed identification of critical areas and variables for sustainable management.

Keywords: Bioindicators. Soil fauna. Precision agriculture.

1 INTRODUÇÃO

O solo é um ambiente ainda "pouco" conhecido, que abriga grande diversidade de organismos capazes de modificar suas características químicas, físicas e biológicas (GILLER et al., 1997; BARETTA et al., 2006). A intensificação agrícola altera significativamente a biodiversidade do solo, com impactos negativos na diversidade faunística e fúngica, enquanto a diversidade bacteriana pode aumentar sob certas condições especialmente com baixos níveis de fertilização mineral ou com uso de insumos orgânicos e práticas de conservação do solo (Z. S.J. Bent et al., 2022), apresentando ligações com a ciclagem de nutrientes, decomposição da matéria orgânica, melhoria da agregação do solo, porosidade, infiltração de água, e com o funcionamento biológico do solo (SANGINGA et al., 1992; ALBUQUERQUE et al., 2009).

A fauna edáfica exerce papel ativo e sensível às práticas agrícolas: enquanto sistemas regenerativos, como o plantio direto aliado à complexidade vegetal, favorecem sua diversidade, a conversão de ecossistemas naturais em produtivos reduz de forma consistente abundância e riqueza desses organismos (Rosa Total et al., 2024).

O solo está intimamente relacionado com outro compartimento, a serrapilheira, e nos sistemas onde os solos apresentam baixa fertilidade natural, a matéria orgânica do solo (MOS) vinda deste resíduo natural, apresenta-se como principal fonte para o crescimento vegetal (CORREIA e OLIVEIRA, 2000), e os organismos que habitam o solo mostram sensibilidade às práticas de manejo desse substrato (NUNES et al., 2009; VICENTE et al., 2010). Os sistemas de plantio direto com rotação de culturas favoreceram maior abundância e diversidade da macrofauna do solo em comparação ao plantio convencional, que degrada a estrutura do solo e reduz a disponibilidade de habitats."(SILVA et al., 2023). A contraposto, o sistema de plantio direto (SPD) favorece altas densidades de organismos fundamentais para a ciclagem de nutrientes e no controle biológico de pragas (ROBERTSON et al., 1994).

A fauna do solo pode ser beneficiada pelo aumento na qualidade e na quantidade de resíduos vegetais, que servem de alimento e abrigo para estes organismos, entretanto, sistemas de monoculturas, fornecem um único substrato orgânico, podendo provocar perdas na diversidade biológica do solo (BARETTA et al., 2003).

Contudo, pouco se sabe ainda sobre o efeito de sistemas de manejo de inverno, ou consórcio de plantas de cobertura sobre a comunidade da fauna do solo (SILVA et al., 2013). Assim, uma das maneiras de se avaliar o impacto de sistemas de manejo de inverno no funcionamento dos ecossistemas é por meio do monitoramento da abundância e diversidade de organismos do solo (SILVA et al., 2015).

A agricultura de precisão (AP) vem se destacando como uma forma de gerenciamento localizado da lavoura, realizada através da disponibilização de ferramentas que permitem a identificação da variabilidade dos atributos da lavoura e sua intervenção de forma localizada (MOLIN, 1998; MENEGATTI et al., 2005). No entanto, a AP tem estado focada basicamente na avaliação de atributos químicos e físicos do solo (CORASSA et al., 2012) A inclusão da fauna edáfica como variável de monitoramento pode ampliar a compreensão da qualidade do solo e do funcionamento dos agroecossistemas, especialmente em diferentes sistemas de manejo de inverno.

Diante disso, este estudo teve como objetivo caracterizar espacialmente a ocorrência da fauna edáfica em diferentes sistemas de manejo de inverno sob SPD,

ISBN 978-65-990392-6-3

correlacionando-a com atributos químicos do solo e a produção de matéria seca das plantas, visando identificar ordens bioindicadoras de qualidade ou estresse edáfico. As hipóteses que nortearam a pesquisa foram: (i) sistemas de manejo de inverno com maior diversidade de plantas de cobertura promovem maior diversidade e abundância de macrofauna do solo; (ii) ordens específicas podem indicar ambientes de alta qualidade edáfica ou degradação; e (iii) ferramentas de AP permitem correlacionar e mapear atributos biológicos e químicos, auxiliando na tomada de decisão para um manejo sustentável.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O experimento foi conduzido na área experimental da Universidade Federal de Santa Maria, campus Frederico Westphalen, RS, localizada nas coordenadas 27°23'24.33" S e 53°25'39.58" O, a uma altitude de 483 m. O clima local é classificado como subtropical de primavera úmida (STPU), com temperatura média anual de 18,1 °C e precipitação média anual de 1.919 mm, bem distribuída ao longo do ano (MALUF, 2000). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (SANTOS et al., 2013), de textura argilosa (66%) e relevo suave ondulado.

Foram avaliados dez sistemas de manejo de inverno implantados no terceiro ano consecutivo, na primeira quinzena de maio, sendo eles: aveia preta (*Avena strigosa S.* – Ap), aveia branca (*Avena sativa L.* – AB), azevém (*Lolium multiflorum L.* – AZ), nabo forrageiro (*Raphanus sativus L.* – NF), ervilhaca (*Vicia sativa L.* – E), tremoço branco (*Lupinus albus L.* – TB), além dos consórcios aveia preta + nabo forrageiro (ApNF), aveia preta + ervilhaca (ApE), aveia preta + ervilhaca + nabo forrageiro (ApNFE) e o pousio invernal (PO) com vegetação espontânea (Tabela 1).

Tabela 1 – Histórico dos cultivos, práticas de adubação e correção realizadas na área experimental. Frederico Westphalen, RS.

Período	Cultura	Adubação (NPK)	Quantidade (kg ha^{-1})	Forma de aplicação
Inverno	Plantas de cobertura	Calagem**	3500***	Lanço/Incorporado**
Verão	Feijão	09-25-15	300	Linha
		45-00-00	250	Lanço
	Milho safrinha	09-25-15	350	Linha
		45-00-00	250	Lanço
Inverno	Plantas de cobertura	**	**	**
Verão	Feijão	09-25-15	300	Linha
		45-00-00	250	Lanço
Inverno	Plantas de cobertura	**	**	**

Legenda: (*) Calcário dolomítico PRNT 85%; (**) Sem Adubação (NPK).
Fonte: Diego Armando Amaro Da Silva (2024)

2.2 COLETA, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

A coleta de dados foi realizada entre setembro e novembro. Na primeira semana de setembro, estimou-se a produção de matéria seca (MS) por sistema de manejo, utilizando um quadro metálico de 0,5 × 0,5 m para amostrar a biomassa aérea, que foi posteriormente seca em estufa a 65 °C até peso constante.

ISBN 978-65-990392-6-3

Na segunda semana de novembro, a macrofauna do solo foi coletada utilizando o método proposto pela *Tropical Soil Biology and Fertility* (TSBF) (ANDERSON; INGRAM, 1993), adaptado para dimensões de 0,25 × 0,25 × 0,10 m, abrangendo a camada superficial de 0 a 10 cm, onde há maior concentração de matéria orgânica (SCHIAVON et al., 2009). Foram retirados cinco blocos de solo por sistema de manejo, dispostos de forma equidistante e georreferenciados. A serrapilheira presente sobre cada bloco também foi coletada. Os pontos de coleta foram georreferenciados com auxílio de receptor GPS, permitindo a sua inserção em ambiente SIG. A área experimental foi vetorizada e delimitada em shapefile, representando os diferentes sistemas de manejo avaliados. Essa etapa possibilitou a representação espacial dos pontos amostrados, permitindo a análise e integração com os mapas interpolados gerados no software SURFER 11®. Tal abordagem favorece a compreensão da distribuição espacial das variáveis biológicas e químicas, enriquecendo a análise da variabilidade edáfica.

O material foi acondicionado em sacos plásticos e encaminhado ao laboratório, onde os organismos foram triados manualmente, identificados ao nível de ordem segundo Gallo et al. (1988), contados e pesados para determinação da biomassa da fauna do solo (BF, g m^{-2}). As abundâncias foram expressas em indivíduos m^{-2} e utilizados para o cálculo dos índices de diversidade de Simpson (Is), Shannon (H) e uniformidade de Pielou (J), por meio do software DivEs 3.0.

A quantificação dos atributos biológicos da fauna edáfica foi realizada considerando três parâmetros principais: (i) abundância, expressa em número de indivíduos por metro quadrado (ind. m^{-2}), obtida pela soma dos organismos identificados em cada monólito; (ii) biomassa da fauna (BF), determinada a partir da pesagem fresca dos organismos triados e extrapolada para a área de coleta (g m^{-2}); e (iii) riqueza de ordens, contabilizada pelo número de grupos taxonômicos distintos encontrados por amostra. A partir dessas variáveis, foram calculados os índices de diversidade de Simpson (Is), Shannon (H) e a uniformidade de Pielou (J), que expressam, respectivamente, a dominância, a diversidade e o equilíbrio da comunidade edáfica, sendo amplamente utilizados como bioindicadores de qualidade do solo (DORAN; ZEISS, 2000; BARETTA et al., 2011).

Simultaneamente, amostras de solo (0,00–0,10 m) foram coletadas nos mesmos pontos para determinação da matéria orgânica do solo (MOS), pH em água (1:1), e teores de fósforo (P) e potássio (K) disponíveis (Tabela 2), segundo metodologias descritas por Tedesco et al. (1995) e recomendadas pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo (2004).

Tabela 2 – Valores dos atributos matéria orgânica do solo (MOS, g kg-1), $pH_{água}$ e teores disponíveis de P e K no solo (mg dm^{-3}) em dez sistemas de manejo de inverno na profundidade de 0,00 - 0,10 m. Frederico Westphalen, RS.

Variáveis	Sistema de manejo de inverno										Média
	Ap	AB	AZ	NF	E	ApNFE	ApNF	ApE	TB	PO	
MOS (g kg^{-1})	27,4	27,7	27,9	27,3	27,8	27,5	27,9	28,4	26,5	27,2	27,6
$pH_{água}$	6,2	6,1	6,6	6,8	6,9	6,8	7,0	7,1	6,9	7,0	6,6
P (mg dm^{-3})	9,3	11,4	13,2	16,6	14,0	12,3	13,6	16,4	15,2	14,1	13,6
K (mg dm^{-3})	225	240	194	204	241	239	216	273	196	202	223

Fonte: Diego Armando Amaro Da Silva (2024)

Os dados foram submetidos à análise exploratória e ao teste de normalidade Shapiro-Wilk (p<0,05). As variáveis foram analisadas em delineamento inteiramente casualizado, com médias comparadas pelo teste de Scott-Knott (p<0,05) conforme recomendação de Ferreira et al. (2012) para as análises dos dados foi utilizado o programa estatístico ASSISTAT 7.7. Também foi realizada correlação simples de Pearson, classificando-se a força da associação como fraca (0,1< r <0,3), moderada (0,4< r <06), forte (r >0,7), e ideal (r =1), conforme Dancey e Reidy (2006). A espacialização dos dados foi feita no software SURFER 11®, gerando mapas temáticos das variáveis biológicas e químicas avaliadas, para a interpolação espacial, utilizou-se o método da krigagem ordinária, por ser amplamente empregado em estudos de variabilidade espacial de atributos do solo, permitindo estimar valores em locais não amostrados com base na estrutura de dependência espacial dos dados (semivariogramas). Foram testados diferentes modelos teóricos (esférico, exponencial e gaussiano), sendo selecionado aquele com melhor ajuste segundo os critérios de menor soma de quadrados dos resíduos e maior coeficiente de determinação do ajuste. As variáveis interpoladas compreenderam tanto os atributos químicos (MOS, pH, P e K) quanto os atributos biológicos da fauna edáfica (abundância, biomassa, riqueza e índices de diversidade). A malha de interpolação foi construída em grade regular com resolução de XX m, gerando os mapas temáticos apresentados (VIEIRA et al., 1983; CAMBARDELLA et al., 1994; CORASSA, 2012).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise descritiva exploratória dos atributos biológicos e químicos do solo e da produção de massa seca (MS) dos sistemas de manejo de inverno. Apenas a produção de MS dos sistemas de manejo, a matéria orgânica do solo (MOS) e os teores de K apresentaram distribuição normal, de acordo com o teste de Shapiro-Wilk.

Tabela 3 – Estatística descritiva e dos atributos biológicos e químicos do solo, e produção de matéria seca (MS, Mg ha-[1]) da área experimental. Frederico Westphalen, RS.

Variável[2]	Parâmetros Estatísticos[1]							
	Valores			DP	Coeficientes			Teste W[3]
	Mínimo	Média	Máximo		CV	Cs	Ck	
Hymenoptera	32	478,4	5696	923,8	193,10	4,42	22,19	0,46*
Oligochaeta	0	53,8	176	49,6	92,32	0,72	-0,50	0,90*
Diplopoda	0	47,0	416	66,7	141,90	3,76	18,86	0,62*
Coleoptera	0	25,0	128	27,8	111,53	1,42	2,53	0,83*
Chilopoda	0	18,6	80	19,8	106,45	1,31	1,47	0,81*
Araneae	0	9,0	48	13,4	149,45	1,43	1,31	0,70*
Isoptera	0	8,0	336	47,5	594,19	6,98	49,10	0,16*
Orthoptera	0	3,2	112	16,2	505,08	6,51	44,20	0,20*
Dermaptera	0	1,9	32	6,2	321,21	3,45	12,38	0,35*
Hemiptera	0	0,6	16	3,2	494,87	4,84	22,33	0,20*
Isopoda	0	1,0	32	5,0	522,72	5,60	32,44	0,19*

ISBN 978-65-990392-6-3

Abundância	80	647,4	5744	903,3	139,53	4,37	22,09	0,50*
Riqueza	2	4,6	8	1,5	33,79	0,27	-0,30	0,95*
BF (g m^{-2})	3,8	34,4	128,3	27,7	80,60	1,35	1,60	0,83*
Índ. Simpson (Is)	0,06	0,45	0,97	0,27	59,24	0,83	-0,75	0,85*
Índ. Shannon (H)	0,04	1,03	1,89	0,51	49,05	-0,70	-0,72	0,90*
Unif. Pielou (J)	0,08	0,67	0,99	0,27	40,65	-0,91	-0,39	0,87*
MS (Mg ha^{-1})	0,73	4,85	8,76	2,06	42,50	0,05	-0,57	$0,98^{ns}$
MOS (g kg^{-1})	23,7	27,6	31,5	1,7	6,15	-0,11	0,20	$0,98^{ns}$
$pH_{água}$	5,84	6,76	7,26	0,36	5,36	-0,79	-0,10	0,92*
P (mg dm^{-3})	6,2	13,6	27,3	4,8	34,97	0,96	1,02	0,94*
K (mg dm^{-3})	117	223	347	54	24,36	0,20	-0,32	$0,99^{ns}$

Legenda: (1) Onde: DP= desvio padrão; CV= coeficiente de variação (%); Cs= coeficiente de assimetria; Ck= coeficiente de curtose. (2) MOS= matéria orgânica do solo; BF= peso da biomassa da fauna edáfica; MS= peso da matéria seca produzida pelos sistemas de manejo de inverno. (3) Teste W: Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: (*) significativo em níveis de p <0,05 e (^{ns}) não significativo. Quando for significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.
Fonte: Diego Armando Amaro Da Silva (2024)

Com base na amplitude dos dados, a abundância de indivíduos m-2 apresentou valor mínimo de 80 e máximo de 5.744. Dentre as principais ordens taxonômicas, a Hymenoptera variou entre 32 e 5.696 indivíduos m-2, sendo a única com ocorrência em todos os blocos de solo coletados. Já a ordem Oligochaeta apresentou variação de 0 a 416 indivíduos m-2, a Diplopoda de 0 a 416 indivíduos m-2, a Coleoptera de 0 a 128 indivíduos m-2 e a Chilopoda de 0 a 80 indivíduos m-2, sendo as ordens citadas, as de maior representatividade na área experimental, correspondendo a 96,34 % dos indivíduos coletados (Tabela 4).

De modo geral, os organismos coletados apresentaram alta variabilidade de ocorrência, com CV > que 92 % em todas as ordens, com a presença de espécies em um determinado sistema de manejo e não em outro, havendo inclusive a não ocorrência de indivíduos (valores = 0) em muitos dos blocos coletados. Foi identificada a não normalidade dos dados e a tendência de médias menores que a moda e a mediana (assimetria negativa), sendo a ocorrência de dados fortemente associados a moda (platicúrticas).

A riqueza de organismos apresentou média variabilidade e variação entre 2 e 8 ordens distintas por bloco de solo coletado, enquanto que o peso da BF apresentou alta dispersão dos dados (alto CV), devido a forte correlação desta variável com a ocorrência da ordem *Oligochaeta* (r = 0,85) (Tabela 5), mesmo tendo está representado apenas 8,4 % dos organismos coletados, e apresentado alta variabilidade. A BF apresentou variação de 3,8 a 128,3 g m-2. Os dados apresentados pela BF devem ser destacados já que indicam que a fauna do solo, na camada superficial do solo (0 - 10 m), com uso correto de sistemas de manejo de inverno, pode alcançar valores de até 1,28 Mg ha-1 de organismos.

Os índices de dominância de Simpson (Is) e de diversidade de Shannon (H) apresentaram variação entre 0,06 a 0,97 e 0,04 e 1,89, respectivamente, enquanto que, o índice de uniformidade de Pielou (J) variou de 0,08 a 0,99, apresentando no

ISBN 978-65-990392-6-3

mínimo CV = 40%, sendo, portanto, de alta variabilidade na área, assim como o observado por Corassa et al. (2012).

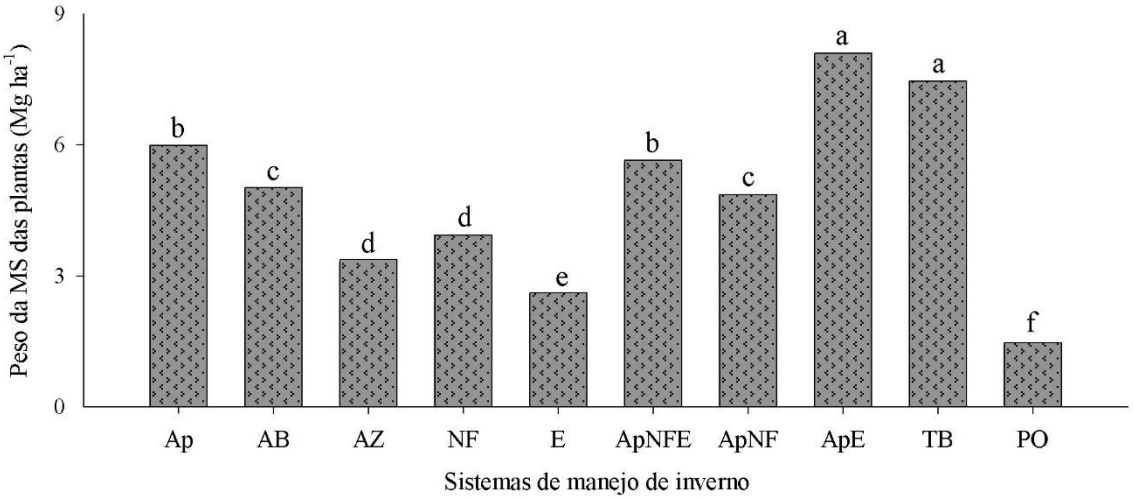
Tabela 4 – Frequência relativa de ocorrência total e por ordem (%) da fauna do solo em dez sistemas de manejo de inverno. Frederico Westphalen, RS.

Ordem taxonômica	Sistema de manejo de inverno										Frequência por ordem
	Ap	AB	AZ	NF	E	ApNFE	ApNF	ApE	TB	PO	
Hymenoptera	3,61	3,46	2,08	4,70	6,13	3,46	5,04	2,42	4,65	38,16	73,70
Oligochaeta	1,48	0,35	0,89	0,84	0,35	1,29	0,84	1,14	0,89	0,35	8,40
Diplopoda	0,64	0,30	0,94	2,08	0,15	1,04	0,79	0,94	0,35	0,05	7,27
Coleoptera	0,94	0,40	0,64	0,05	0,20	0,40	0,15	0,35	0,54	0,30	3,95
Chilopoda	0,30	0,10	0,25	0,54	0,20	0,40	0,40	0,49	0,20	0,15	3,02
Araneae	0,49	0,10	0,20	0,10	0,10	0,05	0,20	0,05	0,05	0,05	1,38
Isoptera	0	1,09	0,05	0	0	0,05	0	0	0,05	0	1,24
Orthoptera	0	0,05	0,05	0,05	0	0	0,35	0	0	0	0,49
Dermaptera	0,05	0	0,15	0	0	0	0	0	0,10	0	0,30
Isopoda	0	0	0	0,10	0	0	0,05	0	0	0	0,15
Hemiptera	0,10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,10

Fonte: Diego Armando Amaro Da Silva (2024)

Os valores da produção de MS das plantas cultivadas nos tratamentos analisados variaram de 0,73 a 8,76 Mg ha-1, observados justamente nos sistemas de menor e maior produção (PO e ApE, com 1,47 e 8,10 Mg ha-1, respectivamente), o que pode ser observado nas Figuras 1 e 2. Chavaut et al. (2003) e Corassa (2012), salientam que a abundância das ordens de organismos edáficos pode ser influenciada pela quantidade e qualidade do material vegetal presente, corroborando com o presente trabalho, visto que 73,70 % dos organismos coletados foram da ordem *Hymenoptera*, sendo mais da metade destes encontrados no PO, sistema de menor produção de resíduos, fazendo com que houvesse correlação negativa moderada entre a produção de MS e ocorrência desta ordem (r = -0,36), indicando que a falta de palhada proporciona maior abundância destes organismos.

Figura 1 – Produção de matéria seca (MS, Mg ha^{-1}) em dez sistemas de manejo de inverno.
Frederico Westphalen, RS.



Fonte: Diego Armando Amaro Da Silva (2024)

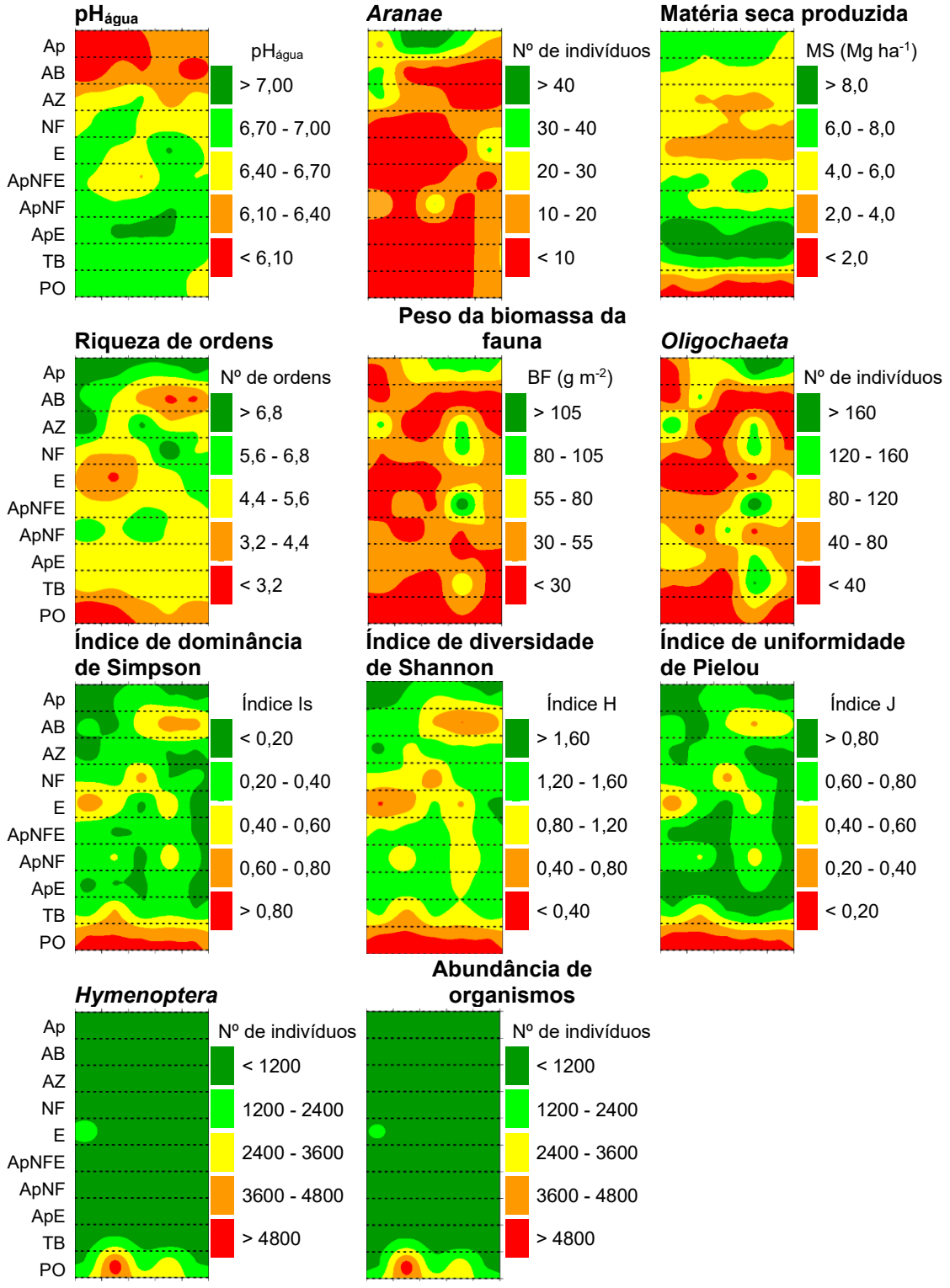
Além disso, a presença destes organismos indicou menor diversidade de organismos, visto que houve correlações moderadas a fortes desta com os índices avaliados (Is, H e J), obtendo ainda valores de r = 0,99 e r = -0,33 para a abundância e riqueza, respectivamente, fato que é visível nas Figuras 2 e 3. Rocha et al. (2015) afirmam que a ocorrência desta ordem pode indicar degradação ambiental das áreas e, segundo Santos et al. (2006), pode servir como bioindicador de estresse do solo, podendo se associar a presença destes organismos a áreas com menor produção de MS, além de menor qualidade do solo.

O uso de bioindicadores é fundamental para o desenvolvimento de políticas agrícolas e ambientais, pois fornecem parâmetros para o monitoramento de práticas sustentáveis. Conforme destacam Brouwer e Crabtree (1999) e Barbieri (2009), esses indicadores ajudam a determinar os mecanismos necessários para manter a composição, estrutura e funcionalidade dos agroecossistemas, garantindo a sustentabilidade dos sistemas de manejo.

Os atributos químicos do solo apresentaram baixa a média variabilidade, com destaque para pH e matéria orgânica do solo (MOS) (Tabela 3). sendo baixa para MOS e $pH_{água}$, e média nos teores de P e K disponíveis no solo. Pode-se notar que a área experimental apresenta de $pH_{água}$ alto (6,76 de média), teores médios de MOS (27,6 g kg^{-1}), e teores muito altos de P e K no solo (13,6 e 223 mg dm^{-3}, respectivamente), a área experimental, com altos níveis de pH, MOS, P e K, não restringiu o desenvolvimento das culturas sob o sistema de plantio direto (SPD) (Fiorin, 2007). Apenas a ordem *Aranae* mostrou uma correlação negativa moderada com o pH (r=−0,40), sendo mais abundante em sistemas de gramíneas solteiras com pH mais baixo. Esse resultado, como observado por Viana et al. (2005) e Corassa (2012), sugere que mesmo em solos quimicamente adequados, a variação biológica persiste, indicando a necessidade de investigar outros fatores.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2 – Distribuição espacial dos atributos químicos e biológicos do solo, e produção de matéria seca das plantas (MS, Mg ha^{-1}) em sistemas de manejo de inverno. Frederico Westphalen, RS.



Fonte: Diego Armando Amaro Da Silva (2024)

ISBN 978-65-990392-6-3

A ordem *Oligochaeta* demonstrou uma correlação positiva fraca a moderada com a produção de matéria seca (MS) (r=0,38). Sua maior abundância foi registrada nos sistemas com maior produção de MS (Ap, TB, ApNFE e ApE), enquanto a menor ocorreu no sistema de pousio. Rovedder et al. (2004) explicam que em SPD, essa variação pode ser um reflexo de um material orgânico mais diversificado, que atende a uma gama mais ampla de organismos, o que também justifica o maior índice de uniformidade (J) observado nos consórcios.

A *Oligochaeta* foi o principal fator que influenciou a biomassa da fauna (BF), com uma forte correlação (r=0,85). Os sistemas com a menor biomassa da fauna (AB, E e PO) foram os que apresentaram as menores populações de *Oligochaeta*, destacando a importância deste grupo como bioindicador de qualidade e quantidade de resíduos orgânicos. Conforme Fragoso et al. (1999) e Andréa (2010), este grupo pode representar de 40% a 90% da biomassa da macrofauna, podendo atingir mais de uma tonelada por hectare sob condições ideais.

A ordem *Oligochaeta* ainda apresentou correlações moderadas com a riqueza e os índices de diversidade e uniformidade avaliados (Is, H e J), com sua presença indicando ambiente de maior diversidade de organismos e, portanto, maior qualidade do solo. Segundo vários autores, as minhocas estão entre os organismos edáficos de maior importância por participarem de processos críticos para a manutenção da fertilidade e qualidade dos solos, agindo na decomposição da MOS e resíduos vegetais, na dinâmica de mineralização de nutrientes, e formando estruturas biogênicas (coprólitos) constituídas de agregados altamente estáveis, garantindo boa porosidade conferindo ao solo maior resiliência e, assim, resistindo mais a degradação (LAVELLE et al., 2001; BLANCHART et al., 2004; BROWN e DOMÍNGUEZ, 2010).

A riqueza de ordens taxonômicas demonstrou correlação moderada com as ordens *Oligochaeta* (r=0,54) e *Aranae* (r=0,67), além de uma correlação negativa com *Hymenoptera*. Esses resultados explicam o sucesso dos sistemas Ap, AZ e ApNF, que apresentaram alta ocorrência das primeiras e baixa da última. Com base nos índices avaliados, pode-se concluir que esses sistemas, juntamente com o consórcio ApE, promovem maior diversidade e qualidade edáfica. Em contrapartida, os sistemas PO, AB e E foram associados à maior dominância e menor equitabilidade.

A sensibilidade da fauna edáfica aos diferentes manejos reflete a capacidade de uma prática ser conservacionista, conforme Correia (2002) e Nunes et al. (2009). Isso evidencia o sucesso na construção da qualidade do solo nos sistemas Ap, AZ e ApNF, e a degradação no sistema de pousio invernal (PO), que se mostra insustentável.

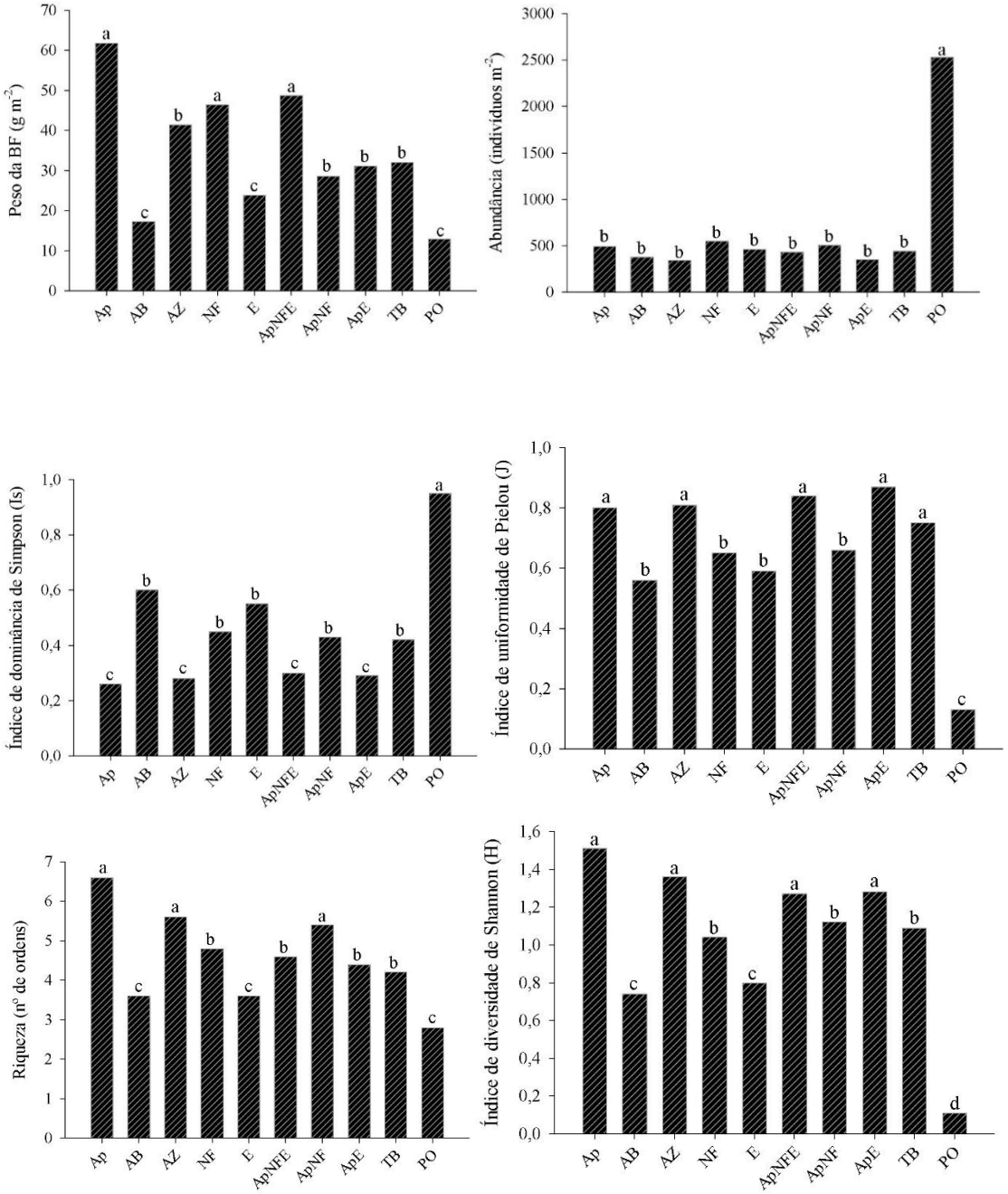
Apesar da complexidade dos resultados apresentados na tabela 5, três fatores se destacam para explicar os dados: a ocorrência de *Oligochaeta* (indicador de qualidade), a ocorrência de *Hymenoptera* (indicador de estresse) e a produção de matéria seca (MS).

As correlações obtidas entre essas variáveis e os índices de diversidade (Is, H, J), abundância e riqueza reforçam suas importâncias.

Por fim, o uso de ferramentas de agricultura de precisão, como coleta georreferenciada e espacialização de dados, mostrou-se valioso. Esses recursos aprimoram a compreensão da ecologia e do comportamento da fauna edáfica, fornecendo um instrumento essencial para a interpretação dos resultados e a visualização de correlações no campo.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 3 – Peso da biomassa da fauna do solo (BF, g m-2), abundância de indivíduos (m-2) riqueza de ordens, e índices de dominância de Simpson (Is), diversidade de Shannon (H) e de uniformidade de Pielou (J) em dez sistemas de manejo de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014.



Legenda: Valores seguidos pela mesma letra minúscula não diferem significativamente pelo teste t (p≤ 0,05).
Fonte: Diego Armando Amaro Da Silva (2024)

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 5 – Matriz de correlação simples de Pearson entre os atributos químicos do solo analisados em dez sistemas de manejo de inverno, Frederico Westphalen, RS.

Atributos[1]	MS	MOS	$pH_{água}$	P	K	BF	Abun.	Riq.	Is	H	J	HYM	OLI	ARA
MS	1	-0,04^{ns}	-0,03^{ns}	0,05^{ns}	0,21^{ns}	0,21^{ns}	-0,33**	0,22^{ns}	-0,49**	0,48**	0,55**	-0,40**	0,38**	0,06^{ns}
MOS		1	0,04^{ns}	0,37**	0,42**	-0,12^{ns}	0,03^{ns}	0,01^{ns}	-0,05^{ns}	0,05^{ns}	0,02^{ns}	-0,01^{ns}	-0,10^{ns}	-0,08^{ns}
$pH_{água}$			1	0,31*	-0,02^{ns}	-0,10^{ns}	0,24^{ns}	-0,22^{ns}	0,15^{ns}	0,15^{ns}	-0,13^{ns}	0,27^{ns}	0,01^{ns}	-0,40**
P				1	0,25^{ns}	-0,13^{ns}	0,17^{ns}	-0,27^{ns}	0,06^{ns}	0,06^{ns}	-0,02^{ns}	0,19^{ns}	-0,10^{ns}	-0,28*
K					1	-0,05^{ns}	-0,01^{ns}	0,05^{ns}	-0,09^{ns}	-0,09^{ns}	0,09^{ns}	-0,02^{ns}	-0,04^{ns}	0,19^{ns}
BF						1	-0,33*	0,50**	-0,37**	0,42**	0,36**	-0,16^{ns}	0,85**	0,39**
Abun.							1	-0,23^{ns}	0,55**	-0,52**	-0,62**	0,99**	-0,05^{ns}	-0,09^{ns}
Riq.								1	-0,63**	0,75**	0,48**	-0,33*	0,54**	0,67**
Is									1	-0,98**	-0,81**	0,61**	-0,46**	-0,35*
H										1	0,92**	-0,59**	0,50**	0,45**
J											1	-0,67**	0,44**	0,22^{ns}
HYM												1	-0,13^{ns}	-0,16^{ns}
OLI													1	0,37**
ARA														1

Legenda: Significativo *(p≤ 0,05) e **(p≤ 0,01); $^{(ns)}$ não significativo. $^{(1)}$ MS= peso da matéria seca produzida pelos sistemas de manejo de inverno; MOS= matéria orgânica do solo; BF= peso biomassa da fauna edáfica; Abun.= abundância de organismos; Riq.= riqueza de ordens; *HYM= Hymenoptera*; *OLI= Oligochaeta*; *ARA= Aranae*.
Fonte: Diego Armando Amaro Da Silva (2024)

A Tabela 5 evidencia correlações significativas entre atributos químicos do solo e a fauna edáfica. O *Oligochaeta* destacou-se como o principal fator associado à biomassa da fauna (BF), com forte correlação positiva (r = 0,85**). Os sistemas com menor BF (AB, E e PO) foram justamente os que apresentaram as menores populações desse grupo, confirmando seu papel como bioindicador da qualidade e da disponibilidade de resíduos orgânicos no solo (FRAGOSO et al., 1999; ANDRÉA, 2010).

Além dessa relação, outros padrões relevantes merecem destaque. O pH apresentou correlação positiva com a matéria orgânica do solo (MOS) (r = 0,37**) e com *Hymenoptera* (r = 0,27*), indicando que solos mais equilibrados quimicamente favorecem condições para organismos bioindicadores. A BF correlacionou-se positivamente com a riqueza de ordens (r = 0,50**) e com o índice de Shannon (r = 0,42**), demonstrando que maior disponibilidade de recursos está associada à diversidade da macrofauna.

Em contrapartida, o peso da matéria seca (MS) apresentou correlações negativas com H (r = -0,48**) e J (r = -0,55**), sugerindo que maior acúmulo de biomassa vegetal não implica necessariamente em maior equilíbrio biológico, possivelmente em função de manejos que priorizam a produção em detrimento da diversidade da fauna.

De forma geral, os resultados indicam que atributos químicos e biológicos do solo estão fortemente interligados. A presença de grupos bioindicadores como *Oligochaeta* e *Hymenoptera,* associada a maiores níveis de MOS e pH equilibrado, reforça a importância de considerar a integração desses parâmetros na avaliação da sustentabilidade dos sistemas de manejo de inverno.

Corassa (2012), em um estudo pioneiro sobre a espacialização de dados biológicos do solo, ressalta que a criação de mapas temáticos a partir de coletas georreferenciadas é uma ferramenta crucial para entender a variabilidade espacial da fauna edáfica no sistema de plantio direto (SPD). Essa abordagem também permite o cruzamento de dados biológicos com outras variáveis do solo.

Esse conhecimento da ecologia e do comportamento dos organismos do solo oferece uma nova perspectiva para a agricultura de precisão (AP), superando as limitações da fertilidade e das variáveis físicas. A AP tradicional, baseada apenas nesses atributos, muitas vezes não consegue explicar as baixas produtividades em certas áreas agrícolas. A inclusão da fauna edáfica na análise se torna, portanto, essencial para compreender a complexidade do sistema solo, contribuindo significativamente para o manejo sítio-específico de culturas e do próprio solo.

4 CONCLUSÃO

Os sistemas de manejo de inverno com aveia preta (Ap), azevém (AZ) e o consórcio aveia preta + nabo forrageiro (ApNF) apresentaram os maiores índices de diversidade e uniformidade da fauna edáfica, além de menor dominância, indicando melhor qualidade do solo. Em contrapartida, o pousio invernal (PO) apresentou baixa riqueza, alta dominância de *Hymenoptera* e reduzida produção de matéria seca, caracterizando-se como sistema de degradação edáfica.

A ordem *Oligochaeta* foi identificada como bioindicador de qualidade do solo, estando associada a sistemas com maior produção de resíduos vegetais e elevada biomassa da fauna. Já a ordem *Hymenoptera* foi considerada bioindicador de degradação, predominando em áreas com baixa cobertura vegetal.

Os atributos químicos do solo apresentaram pouca influência direta sobre a fauna, reforçando que a diversidade e abundância da macrofauna estão mais relacionadas à quantidade
e qualidade dos resíduos vegetais. As ferramentas de agricultura de precisão, por meio da coleta georreferenciada e da espacialização dos dados, mostraram-se eficazes para compreender a distribuição espacial dos bioindicadores, fornecendo subsídios para o manejo sustentável e o monitoramento da qualidade edáfica.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, M. P. et al. Fauna edáfica em sistema de plantio homogêneo, sistema agroflorestal e em mata nativa em dois municípios do Rio Grande do Sul, Brasil. **BIOCIÊNCIAS**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 59-66, dez. 2009.

ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. Soil fauna. In: **Tropical soil biological and fertility: A Handbook of methods**. 2. ed. Wallingford: C. A. B. International, p. 44-46, 1993.

ANDRÉA, M. M. O uso de minhocas como bioindicadores de contaminação de solos. **Acta Zoológica Mexicana**, v. 2, p. 95-107, 2010.
Bent, S. J. et al. **A meta-analysis of the effect of organic and mineral fertilizers on soil microbial diversity**. Applied Soil Ecology, 2022.

BARBIERI, R. F. **Monitoramento da qualidade ambiental de áreas citrícolas utilizando formigas (Hymenoptera: Formicidae) como bioindicadores**. 2009. 119 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2009.

BARETTA, D. et al. Fauna edáfica avaliada por armadilhas de catação manual afetada pelo manejo do solo na região oeste catarinense. **Revista de Ciência Agroveterinárias**, Lages, v. 2, n. 2, p. 97-106, 2003.

BARETTA, D. et al. Efeito do cultivo do solo sobre a diversidade da fauna edáfica no planalto sul catarinense. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 5, n. 2, p. 108-117, 2006.

BARETTA, D. et al. Fauna edáfica e qualidade do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. v.7, 403 p. 119-170.

BLANCHART, E. et al. 2004. Effects of tropical endogeic earthworms on soil erosion: a review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 104, p. 303-315, 2004.

BROUWER, F.; CRABTREE, B. **Environmental indicators and agricultural policy**. Wallingford: CABI Publishing, 1991. 305 p.

BROWN, G. G.; DOMÍNGUEZ, J. Uso das minhocas como bioindicadoras ambientais: princípios e práticas – o 3º encontro latino americano de ecologia e taxonomia de oligoquetas (elaetao3). **Zoológica Mexicana**, v. 2, p. 1-18, 2010.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. ***Soil Science Society of America Journal***, v. 58, n. 5, p. 1501–1511, 1994.

CHAUVAT, M.; ZAITSEV, A. S.; WOLTERS, V. Successional changes of Collembola and soil microbiota during forest rotation. **Oecologia**, v. 137, n. 2, p. 269-276, 2003.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.

CORASSA, G. M. **Técnicas de Agricultura de Precisão aplicadas à avaliação da distribuição espacial da fauna edáfica em Sistema Plantio Direto**. 2012. 45 p. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria. Frederico Westphalen, 2012.

CORREIA, M. E. F,; OLIVEIRA, L. C. M. **Fauna de solo: aspectos gerais e metodológicos**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia. 2000. 46 p. (Documentos, n. 112).

CORREIA, M. E. F. **Potencial de utilização dos atributos das comunidades da fauna do solo e de grupos chaves de invertebrados como bioindicadores do manejo de ecossistemas**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia. 2002. 23 p. (Documentos, n. 157).

DANCEY C. P.; REIDY J. **Estatística sem matemática para psicologia: usando SPSS para Windows**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 608 p.
DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic vompont of soil quality. **Applied Soil Ecology**, n. 15, p. 3-11, 2000.

FERREIRA, D. F.; FILHO, A. C.; LÚCIO, A. D. Procedimentos estatísticos em planejamentos experimentais com restrições na casualização. **Boletim informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.3, p. 16-19, set./dez. 2012.

FIORIN, J. E. **Manejo e Fertilidade do Solo no Sistema Plantio Direto**. Passo Fundo: Berthier, 2007. 184 p.

FRAGOSO, C. P. et al. Earthworm communities of tropical agroecosystems: origin, structure and influence of management practices. In: LAVELLE, P.; BRUSSAARD, L.; HENDRIX, P. F. (Eds.). **Earthworm management in tropical agroecosystems**. Wallingford: CABI Publishing, 1991. p. 27-55.

GALLO, D. et al. **Manual de entomologia agrícola**. 1. ed. São Paulo: Ceres, 1988. 649p.
GILLER, K. E. et al. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function. **Applied Soil Ecology**, v. 6, n. 1, p. 3-16, 1997.

LAVELLE, P. et al. SOM management in the tropics: why feeding the soil macrofauna? **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 61, p. 53-61, 2001.
MALUF, J. R. T. Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, p. 141-150, 2000.

MENEGATTI, L. A. A. et al. Estudo de caso sobre investimento agrícola: oportunidades com agricultura de precisão. **ALCOOLbrás**, São Paulo, v. 95, p. 78-85. ago. 2005.

MENEZES, C. E. G. et al. Macrofauna edáfica em estádios sucessionais de floresta estacional semidecidual e pastagem mista em Pinheiral (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, nov./dez. 2009.

MOLIN. J. P.; Utilização de GPS em agricultura de precisão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 17, n. 3, p. 121-132, mar, 1998.

NUNES, L. A. P. L. et al. Diversidade da fauna edáfica em solos submetidos a diferentes sistemas de manejo no semi-árido nordestino. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 10, p. 43-49, 2009.

NUNES, L. A. P. L.; ARAÚJO FILHO, J. A.; MENEZES, R. Í. Q. Diversidade da fauna edáfica em solos submetidos a diferentes sistemas de manejo no semi-árido nordestino. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 10, n. 1, p. 43-49, 2009.

OLIVEIRA, E. M.; SANTOS, M. J.; SOUTO, J. S. Fauna do solo em três ambientes no município de Lagoa Seca-PB. **Agropecuária Técnica**, João Pessoa, v. 30, n. 1. p. 33-36, 2009.

ROBERTSON, L. N.; KETTLE, B. A.; SIMPSON, G. B. The influence of tillage practices on soil macrofauna in a semi-arid agroecosystem in northeastern Australia. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 48, p. 149-156, 1994.

ROCHA, W. E. et al. Formigas (Hymenoptera: Formicidae) Bioindicadoras de Degradação Ambiental em Poxoréu, Mato Grosso, Brasil. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 22, n. 1, p. 88-98, jan./mar. 2015.

ROSA, D.; et al. Soil fauna diversity is enhanced by vegetation complexity and no-till planting in regenerative agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 367, p. 108259, 15 jun. 2024.

ROVEDDER, A. P. et al. Fauna edáfica em solo suscetível à arenização na região sudoeste do rio grande do sul. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 3, n. 2, p. 87-96, 2004.

SANGINGA, N.; MULONGOY, K.; SWIFT, M. J. Contribution of soil organisms to the sustainability and productivity cropping systems in the tropics. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, v. 41, p. 135-152, 1992.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SANTOS, M. S. et al. Riqueza de formigas (Hymenoptera, Formicidade) da serrapilheira em fragmentos de floresta semidecídua da Mata Atlântica na região do Alto do Rio Grande, MG, Brasil. **Iheringia, Série Zoologia**, Porto Alegre, v. 96, n. 1, p. 95-101, mar. 2006.

SCHIAVON, G. A. et al. **Biodiversidade de minhocas do solo na Estação Experimental Cascata, Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009. 15 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 112).

SILVA, R. F. et al. Fauna edáfica influenciada pelo uso de culturas e consórcios de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 2, p. 130-137, abr./jun. 2013.

SILVA, R. F.; et al. Soil macrofauna correlations with soil chemical and physical properties and crop sequences under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, 2023.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

VIANA, J. H. M., **Distribuição espacial de atributos físico-químicos, mineralógicos e micromorfológicos de Latossolos visando o mapeamento de áreas produtivas**. 2005. 194 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

VICENTE, N. M. F. et al. Fauna Edáfica Auxiliando a Recuperação de Áreas Degradadas do Córrego Brejaúba, MG. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 2, p. 104-110, jul.-dez. 2010.

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque (RS) · cotrijal · UFSM

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. **Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties**. *Hilgardia*, v. 51, n. 3, p. 1–75, 1983.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 15

AGRICULTURA DIGITAL E DE PRECISÃO: ANÁLISE DA PROMOÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS NO MÉDIO E ALTO URUGUAI, RIO GRANDE DO SUL, BRASIL

Digital and precision agriculture: analysis of public policies promoting technology adoption in the Middle and Upper Uruguay region, Rio Grande do Sul, Brazil

Gabriel Thiel Prevedello[1]; Antonio Luis Santi[1]; Schayana Pavelski[1]; Thaís Camila Griebler[1]; Murilo Santi Trentin[1]; Amanda Trentin Moro[1]; Amanda Fornari[1]

[1] Universidade Federal de Santa Maria – Campus Frederico Westphalen – Departamento de Ciências Agrárias, BR386 Km Linha 7 de Se, 98400000, Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul, Brasil, prevedello.gabriel@acad.ufsm.br, santi_pratica@yahoo.com, griebler.thais@acad.ufsm.br, murilo.tretin@acad.ufsm.br, amanda.moro@acad.ufsm.br, amanda.fornari@acad.ufsm.br.

RESUMO

As tecnologias digitais na agricultura, como drones, imagens de satélite, softwares, hardwares e Internet das Coisas, contribuem para uma produção mais eficiente, sustentável e competitiva, reduzindo custos e impactos ambientais. Este trabalho teve como objetivo analisar as políticas públicas de incentivo às tecnologias digitais no meio rural, a partir dos Planos Plurianuais (PPAs) dos municípios pertencentes ao COREDE Médio e Alto Uruguai (RS), com apoio de dados do TCE-RS e do IOA. Foram examinados 20 PPAs municipais do período de 2018 a 2021, considerando que dois documentos estavam indisponíveis para consulta. Os resultados mostraram que não há políticas públicas específicas direcionadas à agricultura de precisão ou digital nos PPAs analisados, embora haja menções a programas gerais de apoio à agricultura. Conclui-se que, apesar da relevância das tecnologias digitais para o setor, ainda há lacunas no planejamento público municipal, reforçando a necessidade de maior integração entre políticas públicas e inovação tecnológica para ampliar a competitividade e a sustentabilidade da produção agrícola.

Palavras-chave: Agricultura Digital. Políticas Públicas. Agricultura de Precisão.

ABSTRACT

Digital technologies in agriculture, such as drones, satellite images, software, hardware, and the Internet of Things, contribute to a more efficient, sustainable, and competitive production system, reducing costs and environmental impacts. This study aimed to analyze public policies that encourage digital technologies in rural areas, based on the Pluriannual Plans (PPAs) of municipalities belonging to the COREDE Middle and Upper Uruguay (RS), with support from TCE-RS and IOA data. Twenty municipal PPAs for the period 2018–2021 were examined, considering that two documents were unavailable for consultation. The results showed no specific public policies directed toward precision or digital agriculture in the analyzed PPAs, although general agricultural support programs were mentioned. It is concluded that, despite the relevance of digital technologies for the sector, there are still gaps in municipal public planning, reinforcing the need for greater integration between public policies and technological innovation to enhance the competitiveness and sustainability of agricultural production.

Keywords: Digital Agriculture. Public Policies. Precision Agriculture.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

A inserção de tecnologias da informação e comunicação (TICs), iniciada pela agricultura de precisão (AP) e seguida pela agricultura digital (AD), surge com o intuito de agregar conhecimento à cadeia agroalimentar melhorando seu dinamismo e integrando seus elos, tornando-a mais eficiente, produtiva e sustentável, além de contribuir para a segurança alimentar (FAO, 2020). Essas tecnologias também facilitam a tomada de decisão do produtor e ajudam a resolver gargalos econômicos, sociais e ambientais do agronegócio, favorecendo a produção de alimentos de maior qualidade com menos uso de recursos (BOLFE et al., 2020).

No entanto, nem todos os produtores possuem capacidade financeira e técnica de adquirir ou capitalizar tais ferramentas e, com isso, uma das formas de o produtor usufruir dessas tecnologias seria através da organização do poder público por meio de políticas públicas voltadas para o setor agrícola, conforme previsto na Lei nº 8.171/1991 (BRASIL, 1991). O modelo orçamentário brasileiro, previsto pela Constituição de 1988, institui o Plano Plurianual (PPA), a Lei de Diretrizes Orçamentárias (LDO) e a Lei Orçamentária Anual (LOA), nas quais devem estar definidos o planejamento e os gastos do mandatário para os próximos quatro anos de gestão. Tal planejamento possui relevância tanto para o controle e equilíbrio das contas públicas quanto para a organização de políticas públicas (COUTO, 2018). Segundo Capella (2018), a formulação de políticas públicas é composta por diversas etapas. No entanto, duas se destacam por sua importância: a definição da agenda e a definição das alternativas. A primeira pode ser compreendida como a delimitação da problemática, e a segunda, como a busca pelas alternativas para a resolução de impasses.

O agronegócio é uma das principais atividades econômicas no estado do Rio Grande do Sul, com mais de 440 mil estabelecimentos agropecuários ocupando 45% do território, sendo que 80% dessas terras são ocupadas por pastagens ou lavouras. Tornando o agronegócio umas das principais fontes de renda da população, principalmente em municípios que possuem menos de 5 mil habitantes (FEIX et al., 2016). No ano de 2018, o Produto Interno Bruto (PIB) da agropecuária do estado foi de R$ 457,29 bilhões, com um Valor Adicionado Bruto (VAB) da agropecuária de 8,98%. Considerando que o VAB agropecuário dos demais estados brasileiros foi, em média 6%, o que denota a importância e a dependência da agricultura por parte do estado (FEIX e LEUSIN, 2019).

Diante da relevância da agricultura para a economia dos municípios do COREDE Médio e Alto Uruguai, a hipótese deste estudo é de que seus planos plurianuais conteriam políticas públicas voltadas ao estímulo do desenvolvimento regional, especialmente na adoção ou melhoria da agricultura de precisão e das tecnologias digitais. O objetivo deste trabalho é analisar os Planos Plurianuais municipais de 2018 a 2021 desses municípios para verificar a presença e o caráter das políticas públicas voltadas à agricultura digital e de precisão, avaliando assim o papel do planejamento público na promoção da inovação tecnológica no meio rural.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho caracterizou-se como uma abordagem descritiva, exploratória e documental, configurando-se como um estudo de casos múltiplos, cujas unidades de caso foram os municípios pertencentes ao COREDE Médio e Alto Uruguai. Os casos foram selecionados considerando a disponibilidade dos Planos Plurianuais (PPAs) municipais para o período de 2018 a 2021. A análise documental considerou os PPAs municipais como corpus principal, enquanto os PPAs estaduais, federais e leis setoriais foram apenas para contexto de apoio para interpretação, sem compor a base de dados para conclusões específicas.

A extração das informações nos PPAs municipais seguiu um protocolo estruturado, no qual foram analisados campos relacionados a ações, programas e projetos voltados à agricultura digital e de precisão. Palavras-chave específicas, como “tecnologia digital”, “agricultura de precisão”, “inovação tecnológica” e “políticas públicas” foram identificadas para categorizar os dados. A leitura dos documentos foi realizada de forma dupla, por dois avaliadores independentes, e eventuais divergências na interpretação das informações foram resolvidas mediante consenso.

Dessa forma, a análise permitiu mapear a presença, a abrangência e o caráter das políticas públicas voltadas à adoção de tecnologias digitais nos municípios estudados, mantendo o foco nas unidades de caso municipais e garantindo a consistência e a confiabilidade dos dados coletados.

2.1 ÁREA DE ESTUDO

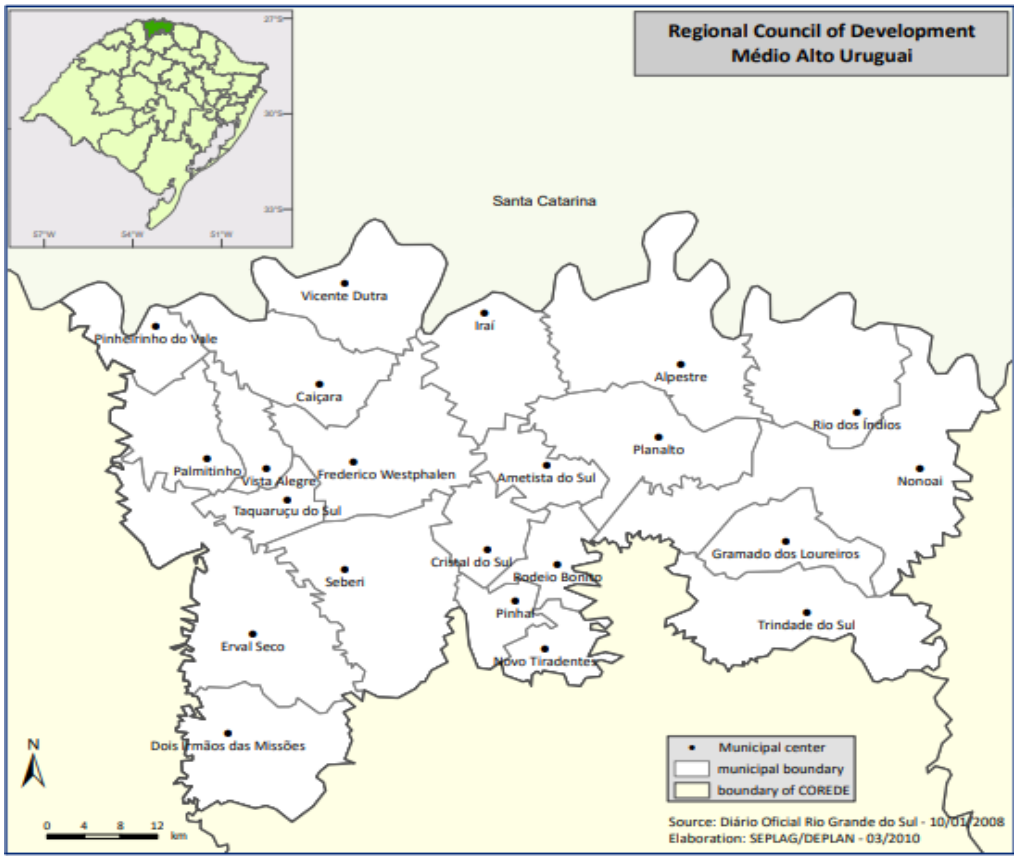
Os Conselhos Regionais de Desenvolvimento (COREDES) constituem uma forma de organização voltada à identificação das necessidades e potencialidades regionais, com o objetivo de subsidiar a formulação de políticas públicas no estado do Rio Grande do Sul. O Plano Plurianual (PPA) estadual é, portanto, estruturado em nove regiões funcionais de planejamento e 28 COREDES, abrangendo os 497 municípios gaúchos.

A área de estudo está inserida **na** Região Funcional 9**,** composta pelos COREDES Médio e Alto Uruguai, Norte, Rio da Várzea, Produção, Nordeste e Alto da Serra do Botucaraí. O COREDE Médio e Alto Uruguai, foco desta pesquisa, é formado pelos municípios de Alpestre, Ametista do Sul, Caiçara, Cristal do Sul, Dois Irmãos das Missões, Erval Seco, Frederico Westphalen, Gramado dos Loureiros, Iraí, Nonoai, Novo Tiradentes, Palmitinho, Pinhal, Pinheirinho do Vale, Planalto, Rio dos Índios, Rodeio Bonito, Seberi, Taquaruçu do Sul, Trindade do Sul, Vicente Dutra e Vista Alegre (RIO GRANDE DO SUL, 2015).

A distribuição espacial dos municípios que compõem o COREDE Médio e Alto Uruguai está apresentada na Figura 1, que ilustra a localização e delimitação geográfica das unidades de análise. A região caracteriza-se por uma expressiva população rural, que representava 45% do total segundo o Censo de 2010. Em 2020, os municípios somavam 144.355 habitantes, dos quais aproximadamente 65 mil residiam no meio rural (IBGE, 2020a). Segundo dados de 2015, baseados no Censo de 2010, em 12 dos 22 municípios a população rural era superior à urbana, com predominância de pequenas propriedades (RIO GRANDE DO SUL, 2015). Do ponto

de vista econômico, a agropecuária desempenha papel central. Em 2018, o PIB da agropecuária, calculado pelo IBGE a partir do PIB dos municípios, representava 20% da soma dos 22 municípios estudados, valor superior à média estadual (8%) e nacional (4%) (IBGE, 2019). Os valores são apresentados em nominais. A produção agrícola totalizou R$ 987 milhões em 2019, equivalente a 2,3% do valor produzido no estado (IBGE, 2020b).

Figura 1 – Mapa do COREDE Médio e Alto Uruguai



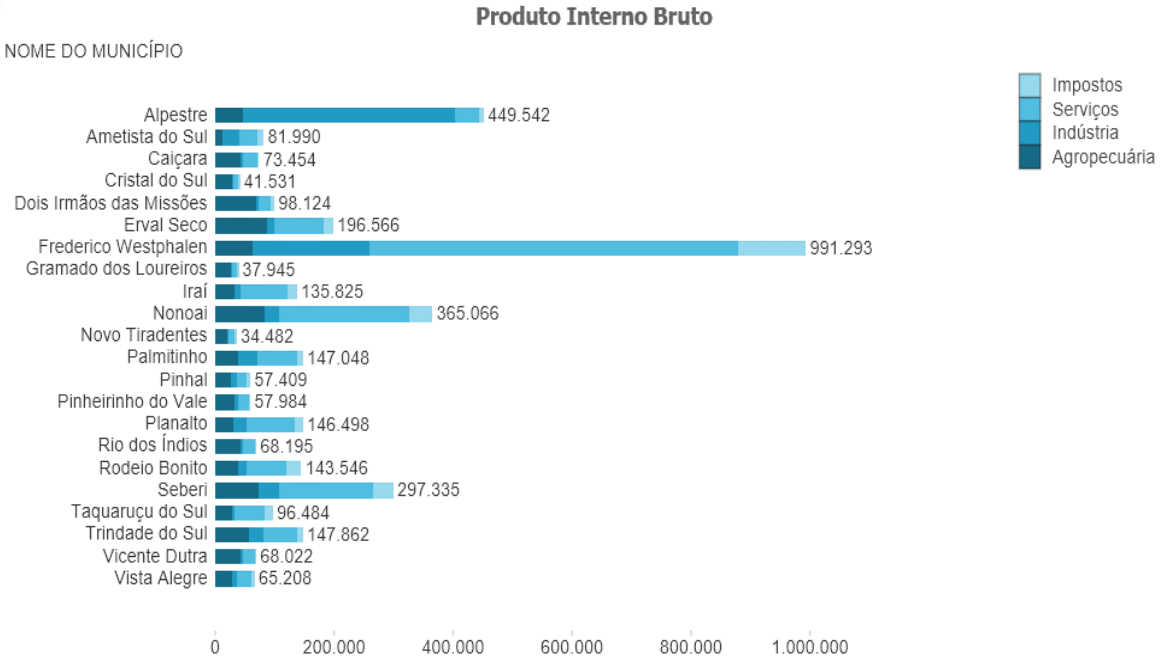
Fonte: Adaptado de SEPLAG/DEPLAN, 2010

A variação da produção agropecuária entre 2016 e 2019 foi de 1% no período, calculada como taxa acumulada segundo a fórmula: Variação (%) = (Valor final – Valor Inicial) / Valor inicial x 100. Enquanto isso, o crescimento no Rio Grande do Sul e no Brasil foi de 6% e 13%, respectivamente, utilizando a mesma metodologia.

A distribuição e evolução da produção agropecuária nos municípios do COREDE Médio e Alto Uruguai está apresentada no Figura 2, que ilustra os valores anuais da produção e a participação relativa no PIB regional. Além disso, a região dispõe de universidades públicas e privadas que oferecem cursos em agronomia, medicina veterinária, administração, gestão pública e sistemas de informação bem como conta com um polo tecnológico vinculado à agroindústria, à agropecuária e à mineração.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2 – *Composição setorial do PIB municipal,*



Legenda: Valores representados em R$ milhões.
Fonte: IBGE (2018)

2.2 COLETA, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

A pesquisa foi conduzida como um estudo de casos múltiplos, tendo como unidade de análise os municípios do COREDE Médio e Alto Uruguai. A coleta de dados foi realizada nos sites das prefeituras e nos portais de transparência dos municípios, com foco nos Planos Plurianuais (PPAs) de 2018–2021. Nos casos em que os documentos não estavam disponíveis, foram feitos contatos telefônicos e solicitações junto ao Serviço de Informação ao Cidadão (SIC). Apesar desses esforços, não foi possível obter os PPAs dos municípios de Caiçara e Gramado dos Loureiros, portanto, a análise considerou 20 municípios.

A pesquisa concentrou-se na análise das políticas públicas vinculadas à Secretaria Municipal de Agricultura, uma vez que esta pasta concentra a maioria das ações diretamente voltadas ao desenvolvimento agrícola. Reconhece-se que políticas relacionadas à agricultura de precisão e agricultura digital podem estar presentes em outras secretarias, como Inovação, Indústria e Comércio ou Educação; portanto, as conclusões deste estudo referem-se exclusivamente ao escopo da Secretaria de Agricultura.

Durante a leitura dos PPAs, foram identificadas e classificadas todas as ações que mencionavam o tema, incluindo agricultura digital e de precisão, assim como iniciativas correlatas, como melhoria de telecomunicações, incentivo à pesquisa e rastreabilidade. A classificação foi feita com base em palavras-chave e exemplos predefinidos, considerando como “Sim” qualquer menção direta ou indireta ao tema. Foram excluídas ações não relacionadas à agricultura ou sem vínculo com tecnologias digitais ou de precisão. Para garantir reprodutibilidade, todos os documentos foram

avaliados por dois pesquisadores de forma independente, e divergências foram resolvidas por consenso.

Os valores financeiros destinados à Secretaria Municipal de Agricultura foram obtidos por meio dos PPAs e complementados com dados do Tribunal de Contas do Estado do Rio Grande do Sul (TCE-RS). Foram analisadas as variáveis referentes à Função/Subfunção Agropecuária, considerando os estágios da despesa (empenhado, liquidado e pago). Os valores estão expressos em reais nominais.

O Índice de Orientação Agrícola (IOA) foi utilizado para caracterizar a estrutura agrícola municipal. Para padronização, o índice será referido neste estudo apenas como IOA, conforme calculado pelo TCE-RS. O cálculo do IOA municipal foi realizado com a seguinte fórmula: IOA = Despesas com agriculra / Valor total das despesas municipais x 100. Onde “Despesas com Agricultura” corresponde ao total empenhado pela Secretaria Municipal de Agricultura. Caso o IOA não seja abordado na seção de resultados, o índice será citado apenas como referência metodológica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os municípios do COREDE Médio e Alto Uruguai apresentam destacada dependência direta da agropecuária, definida aqui como o setor com maior Valor Adicionado Bruto (VAB) no ano-base (IBGE, 2018). Entre os 20 municípios analisados (excluindo Caiçara e Gramado dos Loureiros, cujos PPAs não foram obtidos), sete apresentaram a agricultura como a atividade com maior VAB: Cristal do Sul, Dois Irmãos das Missões, Erval Seco, Rio dos Índios, Trindade do Sul e Vicente Dutra. Dois municípios tiveram a pecuária como principal setor: Pinhal e Vista Alegre. Além disso, em dois municípios, a agricultura representa o segundo maior VAB (Novo Tiradentes e Pinheirinho do Vale), e em um, a pecuária (Pinheirinho do Vale). Portanto, 12 dos 20 municípios analisados apresentam dependência direta da agropecuária.

Destaca-se, ainda, o papel da Administração pública como atividade relevante em muitos municípios, sendo a principal fonte de VAB em localidades onde a agropecuária não domina a economia. De acordo com os dados do TCE-RS (SD), os valores investidos na agricultura mostram tendência de diminuição em alguns municípios, incluindo Alpestre, Dois Irmãos das Missões, Erval Seco, Frederico Westphalen, Iraí, Nonoai, Novo Tiradentes, Pinhal, Pinheirinho do Vale, Rodeio Bonito, Vicente Dutra e Vista Alegre. Os valores referem-se às despesas empenhadas pela Secretaria Municipal de Agricultura. Entre os municípios com maior VAB agrícola, Dois Irmãos das Missões, Erval Seco e Vicente Dutra mantêm a agricultura como principal setor, enquanto Pinhal e Vista Alegre têm a pecuária como principal atividade. Municípios como Novo Tiradentes e Pinheirinho do Vale, que possuem a agropecuária como segundo setor de maior VAB, registraram quedas nos investimentos de 12% e 13%, respectivamente.

Nos demais municípios que apresentaram redução nos investimentos na agropecuária (Alpestre, Frederico Westphalen, Iraí, Nonoai, Rodeio Bonito, Seberi e Taquaruçu do Sul), o setor de serviços representa o principal VAB. Ressalta-se que

esta associação é descritiva, não indicando causalidade entre redução nos investimentos agrícolas e aumento da participação do setor de serviços, pois tal análise demandaria investigação específica. A seguir, apresenta-se a Tabela 1, que resume o VAB por setor econômico nos municípios analisados, permitindo visualização clara da dependência da agropecuária:

Tabela 1 - Valor total investido na agricultura dos anos de 2016 a 2019 em cada município do COREDE Alto e Médio Uruguai

Município	2016	2017	2018	2019	Evolução 2016-2019
Alpestre	60.753	58.546	48.973	51.212	-16%
Ametista do Sul	10.992	15.125	12.373	14.762	34%
Caiçara	47.066	45.968	44.921	50.040	6%
Cristal do Sul	29.978	20.932	29.700	33.346	11%
Dois Irmãos das Missões	82.104	74.242	77.916	80.709	-2%
Erval Seco	88.372	71.828	81.064	82.276	-7%
Frederico Westphalen	50.445	43.102	40.148	49.402	-2%
Gramado dos Loureiros	25.116	25.046	31.666	35.876	43%
Iraí	50.743	43.538	32.803	50.285	-1%
Nonoai	97.468	83.500	103.995	95.625	-2%
Novo Tiradentes	24.507	17.609	20.430	21.546	-12%
Palmitinho	19.627	18.480	19.167	24.805	26%
Pinhal	17.609	13.059	8.212	9.176	-48%
Pinheirinho do Vale	20.949	18.514	15.385	18.282	-13%
Planalto	44.316	45.986	41.223	45.588	3%
Rio dos Índios	44.134	40.986	48.663	46.586	6%
Rodeio Bonito	26.387	20.349	23.229	24.872	-6%
Seberi	93.246	70.555	78.667	93.305	0%
Taquaruçu do Sul	19.590	14.727	17.549	19.721	1%
Trindade do Sul	55.118	58.642	59.943	70.135	27%

ISBN 978-65-990392-6-3

Vicente Dutra	58.727	52.217	54.307	57.185	-3%
Vista Alegre	15.091	12.136	12.008	12.858	-15%
TOTAL	982.338	865.087	902.342	987.592	1%

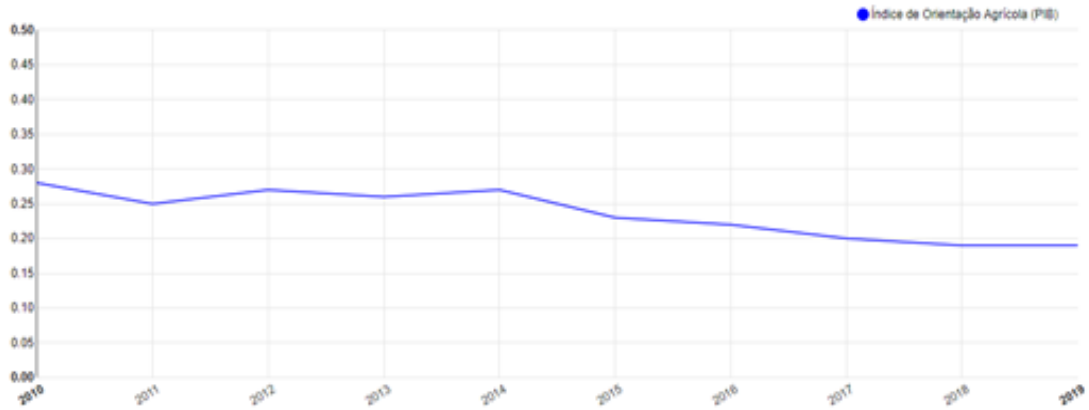
Legenda: Unidades em R$ milhões, variação calculada como (Valor 2019 - Valor 2016) / Valor 2016 x 100

Fonte: TCE-RS. Consulta individual por município (2021)

O Índice de Orientação Agrícola (IOA) é um indicador utilizado para analisar a relação entre os gastos governamentais em agropecuária e a participação do setor no Produto Interno Bruto (PIB), permitindo mensurar a promoção de infraestrutura rural, pesquisa, extensão de serviços agrícolas e desenvolvimento tecnológico, refletindo, de forma geral, a capacidade produtiva agrícola em países em desenvolvimento. No caso do Brasil, observa-se uma tendência de queda no IOA entre os exercícios de 2010 a 2019, com acentuação a partir de 2015, conforme avaliação disponível no portal da ODS Brasil, mantido pelo governo federal.

Para este estudo, a métrica foi adaptada para o nível municipal, considerando a proporção das despesas empenhadas pelas Secretarias Municipais de Agricultura em relação ao total de gastos municipais. A fórmula utilizada foi: IOA = Despesas empenhadas com Agricultura / Total das despesas municipais x 100. A Figura 3 apresenta a evolução desse indicador para os municípios do COREDE Médio e Alto Uruguai no período analisado (IBGE, 2019), permitindo visualização da capacidade de investimento público na agropecuária local.

Figura 3 - Índice de orientação agrícola para a despesa pública



Fonte: IBGE (2019)

Apesar da importância da agropecuária nos municípios do COREDE Médio e Alto Uruguai, observa-se baixa aplicação de recursos públicos no setor. Para esta análise, foi calculado o Índice de Orientação Agrícola (IOA) municipal, adaptado a partir do conceito nacional do IOA, como a proporção das despesas empenhadas pelas Secretarias Municipais de Agricultura em relação à despesa total do município, conforme fórmula de cálculo de IOA.

O critério adotado para destaque foi IOA municipal superior a 10%, considerando que investimentos acima desse patamar indicam aplicação relevante do orçamento municipal no setor agrícola, conforme prática de análise de alocação de recursos municipais. Com base nesse critério, em 2018, apenas os municípios de Alpestre e Ametista do Sul apresentaram IOA superior a 10%. A Tabela 2 a seguir apresenta os valores da agropecuária (mil R$), das despesas totais do município (mil R$) e o cálculo do IOA municipal (%) para todos os municípios do COREDE Médio e Alto Uruguai.

Tabela 2 - Índice de Orientação Agrícola (IOA) municipal dos municípios do COREDE Médio e Alto Uruguai – 2018

Município	Agropecuária	Despesa	IOA
Alpestre	44.673	4.711	11%
Ametista do Sul	12.106	1.497	12%
Caiçara	42.194	1.619	4%
Cristal do Sul	28.514	1.029	4%
Dois Irmãos das Missões	68.242	997	1%
Erval Seco	86.590	1.102	1%
Frederico Westphalen	63.253	649	1%
Gramado dos Loureiros	26.038	667	3%
Iraí	32.311	625	2%
Nonoai	82.346	1.120	1%
Novo Tiradentes	20.354	1.607	8%
Palmitinho	37.208	2.305	6%
Pinhal	25.367	1.416	6%
Pinheirinho do Vale	32.075	2.776	9%
Planalto	30.266	456	2%
Rio dos Índios	42.895	373	1%
Rodeio Bonito	36.671	1.753	5%
Seberi	73.785	863	1%
Taquaruçu do Sul	27.300	2.313	8%

Trindade do Sul	54.849	1.362	2%
Vicente Dutra	42.003	744	2%
Vista Alegre	28.019	1.331	5%

Fonte: Autor

Diante do baixo investimento em agropecuária observado nos municípios do COREDE Médio e Alto Uruguai, é relevante verificar como os planejamentos plurianuais (PPAs) estabelecem objetivos e metas para o setor. A análise dos PPAs municipais de 2018–2021 mostrou que, em geral, as ações vinculadas à Secretaria de Agricultura são esparsas, limitando-se a programas de incentivo à produção agrícola, melhorias em infraestrutura rural e pequenos projetos de extensão. Os valores alocados para essas ações, quando presentes, representam menos de 10% do orçamento total da pasta, reforçando a necessidade de políticas públicas mais consistentes para compensar a escassez de recursos financeiros e estimular o desenvolvimento do setor.

3.1 POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A AGRICULTURA DE PRECISÃO E PARA A AGRICULTURA DIGITAL

Nos PPAs acessíveis dos municípios do COREDE Médio e Alto Uruguai, não foram identificadas políticas públicas voltadas especificamente à agricultura de precisão (AP) ou agricultura digital (AD). Para essa análise, foram consultados termos-chave nos documentos, como “agricultura de precisão”, “agricultura digital”, “tecnologia da informação”, “gestão agrícola” e “inovação tecnológica no campo”, conforme o protocolo definido na seção de Métodos.

De acordo com Bernardi et al. (2017), o uso de técnicas de AP, considerando a variabilidade espaço-temporal e a aplicação otimizada de insumos, é fundamental para aumentar a produtividade, reduzir impactos ambientais e promover uma gestão agrícola racional, responsável e rastreável, demandando mão de obra especializada e contribuindo para o desenvolvimento sustentável e a competitividade do agronegócio.

Apesar da presença de universidades e centros de formação técnica na região, os PPAs analisados não apresentam ações explícitas de promoção de pesquisas ou capacitação de profissionais voltadas à utilização de ferramentas de tecnologia da informação na produção agropecuária. Algumas iniciativas indiretas, como programas de incentivo à inovação tecnológica e melhorias em infraestrutura rural, podem contribuir parcialmente para a disseminação dessas tecnologias. Na Tabela 3 a seguir, são apresentadas as políticas públicas identificadas que, ainda que de forma indireta, podem favorecer a adoção da Agricultura Digital, categorizando-as segundo as principais vertentes desta nova forma de produção.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 3 - Discriminação de políticas públicas encontradas no PPA do COREDE Médio e Alto Uruguai.

Município	AD	AP	Telecomunicações	Pesquisa	Rastreabilidade
Alpestre	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Ametista do Sul	Não	Não	Não	Não	Não
Caiçara	ND	ND	ND	ND	ND
Cristal do Sul	Não	Não	Não	Não	Não
Dois Irmãos das Missões	Não	Não	Não	Não	Não
Erval Seco	Não	Não	Não	Não	Não
Frederico Westphalen	Não	Não	Sim	Não	Sim
Gramado dos Loureiros	ND	ND	ND	ND	ND
Iraí	Não	Não	Sim	Não	Não
Nonoai	Não	Não	Não	Não	Não
Novo Tiradentes	Não	Não	Não	Não	Não
Palmitinho	Não	Não	Não	Não	Não
Pinhal	Não	Não	Sim	Não	Não
Pinheirinho do Vale	Não	Não	Não	Não	Não
Planalto	Não	Não	Não	Não	Não
Rio dos Índios	Não	Não	Não	Não	Não
Rodeio Bonito	Não	Não	Sim	Não	Não

Seberi	Não	Não	Não	Não	Não
Taquaruçu do Sul	Não	Não	Não	Não	Não
Trindade do Sul	Não	Não	Não	Não	Não
Vicente Dutra	Não	Não	Não	Não	Não
Vista Alegre	Não	Não	Não	Não	Não

Legenda: “Sim” caso haja políticas públicas referentes ao setor e “Não” caso contrário.

Fonte: PPAs de cada município (2021)

3.1.2 Telecomunicações

As ações de telecomunicação nos municípios do COREDE Médio e Alto Uruguai apresentam diferentes enfoques. Entre os 22 municípios, apenas Alpestre e Frederico Westphalen preveem explicitamente melhorias em antenas e acesso à internet voltados ao público rural (ALPESTRE, 2019; FREDERICO WESTPHALEN, 2017). Em Alpestre, o programa “Melhoria dos sistemas de comunicações sociais comunitárias” busca aprimorar a comunicação rural por meio da aquisição de equipamentos, subvenções e materiais. Em Frederico Westphalen, o programa “Desenvolvimento das atividades rurais” prevê R$ 6.230.000,00 para infraestrutura, telefonia e internet rural, embora não detalhe de que forma os investimentos atenderão às finalidades propostas.

Já Rodeio Bonito, Pinhal e Nonoai apresentam iniciativas de inclusão digital voltadas ao público urbano ou comunitário, por meio de pontos públicos de acesso ou telecentros gratuitos (RODEIO BONITO, 2017; PINHAL, 2017; NONOAI, 2017). Pinhal investe em projetos de comunidade digital, enquanto Rodeio Bonito prevê R$ 422.240,00 para manutenção de telecentros, pessoal, materiais e equipamentos. Nonoai implementa centro de inclusão digital com cursos de qualificação, estimando R$ 30.000,00 para equipamentos e manutenção.

Outros municípios, como Planalto e Iraí, concentram suas ações em sinal de TV e telefonia celular. Planalto planeja instalar duas torres de telefonia celular e manter centrais de TV e telefonia, com previsão de R$ 67.884,45 para manutenção (PLANALTO, 2017). Em Iraí, a Secretaria Municipal de Educação prevê apenas a manutenção de antenas de TV, sem detalhamento de valores (IRAI, 2017).

De modo geral, as iniciativas identificadas são pontuais e de alcance restrito, sem definição clara de metas, prazos, indicadores de cobertura ou estratégias de expansão, elementos que caracterizariam um planejamento adequado. De acordo com

ISBN 978-65-990392-6-3

a OCDE (2020), o Brasil avançou no acesso à internet, mas ainda necessita de maior coordenação das políticas de transformação digital e de mais recursos destinados à Estratégia Brasileira de Transformação Digital (E-Digital). Segundo Ángel Gurría, secretário-geral da OCDE, tecnologias digitais e conectividade são essenciais para enfrentar crises econômicas e construir uma economia mais resiliente e inclusiva.

3.1.3 Pesquisa

A análise dos PPAs municipais revelou que não foram identificadas iniciativas voltadas especificamente à pesquisa em agricultura digital ou agricultura de precisão. Para este estudo, entende-se como “pesquisa” a previsão de programas, projetos ou convênios destinados ao desenvolvimento de novas tecnologias, inovação ou produção de conhecimento científico aplicado à agropecuária.

Entretanto, no caso de Alpestre, foram verificadas ações relacionadas à capacitação e assistência técnica, ainda que não configuradas como pesquisa. O PPA 2018–2021 prevê a manutenção da Casa Familiar Rural, subsídios a filhos de agricultores interessados em permanecer nas propriedades, cursos técnicos e de nível superior voltados ao meio rural, além de convênios com universidades, centros de treinamento, associações e a EMATER-RS, bem como parcerias públicas e privadas (ALPESTRE, 2019).

O município também possui o programa de Assistência e Acompanhamento a Produtores da Agricultura Familiar, cujo objetivo estratégico é “manter ações de formação de produtores rurais e manter convênio com a Emater”, buscando reduzir o êxodo rural e garantir assistência técnica. Para a execução dessas iniciativas, estão previstos gastos de R$ 773.837,67 no período de 2018 a 2021 (ALPESTRE, 2019).

Dessa forma, observa-se que, entre os PPAs acessíveis, apenas Alpestre apresentou ações relacionadas à capacitação e assistência técnica, sem que fossem registradas iniciativas que caracterizem efetivamente atividades de pesquisa no campo da agricultura digital.

3.1.4 Rastreabilidade

Nos Planos Plurianuais (PPAs) dos municípios do COREDE Médio e Alto Uruguai, a busca por termos como “rastreabilidade”, “selo de origem” e “certificação” não identificou políticas específicas voltadas à adoção de sistemas de rastreabilidade digital no setor agropecuário. A rastreabilidade, em sentido técnico, envolve o registro e acompanhamento de todas as etapas da produção e circulação de produtos, por meio de ferramentas como etiquetas, códigos de barras ou sistemas digitais integrados.

O único município que apresentou ação relacionada ao tema foi Alpestre, que instituiu o programa de certificação Selo Agroecológico. Trata-se, contudo, de uma iniciativa de certificação de processo produtivo, voltada para produtos da agricultura familiar com manejo ecológico e sem uso de agrotóxicos, não se configurando como rastreabilidade digital. O programa prevê gastos de R$ 4.353.738,69 para o período de 2018 a 2021, sendo R$ 1.901.353,96 destinados à manutenção do sistema de selo, incluindo serviços, materiais e equipamentos (ALPESTRE, 2019).

Portanto, pode-se afirmar que, no recorte analisado, não foram encontradas políticas públicas municipais que tratem diretamente da rastreabilidade agrícola em nível digital. A presença do selo em Alpestre indica reconhecimento da importância da certificação de qualidade e da valorização da produção familiar, mas não substitui políticas estruturadas de rastreabilidade. Essa lacuna evidencia a necessidade de maior integração de tecnologias digitais e de mecanismos de acompanhamento produtivo nos instrumentos de planejamento municipal.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo analisar os Planos Plurianuais (PPAs) de municípios pertencentes ao COREDE Médio e Alto Uruguai, a fim de verificar a presença de políticas públicas voltadas à Agricultura Digital (AD) e à Agricultura de Precisão (AP).

Os resultados indicaram que, no período de 2018–2021, os PPAs acessíveis não apresentaram menções diretas à AD ou à AP. As iniciativas identificadas concentram-se em ações de caráter mais amplo, como capacitação de agricultores, manutenção de convênios para assistência técnica, inclusão digital por meio de telecentros e apoio à agricultura familiar. Tais ações, ainda que relevantes, possuem enfoque mais tradicional e não configuram estratégias voltadas especificamente à digitalização do setor agrícola.

Dentro desse contexto, destaca-se o município de Alpestre, que apresentou, em seu PPA, programas de apoio à permanência dos jovens no meio rural, manutenção da Casa Familiar Rural e incentivo à certificação agroecológica. Embora não configurem diretamente uma política de Agricultura Digital, essas ações demonstram preocupação com a valorização da produção local e com a sucessão rural, o que pode indiretamente contribuir para um ambiente mais receptivo à adoção de inovações tecnológicas no futuro.

De modo geral, observa-se que as políticas municipais analisadas ainda se limitam a ações assistenciais e de apoio genérico, sem estabelecer metas, indicadores ou estratégias de médio e longo prazo voltadas à inovação tecnológica na agricultura. Essa constatação evidencia uma lacuna entre a relevância econômica do setor agrícola na região e a ausência de políticas públicas municipais estruturadas para fomentar sua modernização digital.

Cabe ressaltar, entretanto, a limitação metodológica do estudo, uma vez que nem todos os PPAs municipais estavam disponíveis para consulta, o que pode ter restringido a identificação de iniciativas adicionais. Ainda assim, a análise realizada

ISBN 978-65-990392-6-3

permite concluir que, no período considerado, não houve políticas específicas de incentivo à Agricultura Digital nos municípios do COREDE Médio e Alto Uruguai, sendo este um campo em aberto para futuras estratégias de desenvolvimento regional.

.

REFERÊNCIAS

ALPESTRE, **Plano Plurianual 2018/2021**. Prefeitura Municipal de Alpestre, 2017.

BERNARDI, A. C. de C.; LUCHIARA JUNIOR, A.; PEREZ, N. B.; INAMASU, R. Y. **Potencial de uso das tecnologias da agricultura e pecuária de precisão e automação**, 2017. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1069365/potencial-de-uso-das-tecnologias-de-agricultura-e-pecuaria-de-precisao-e-automacao

BOLFE, E. **Agricultura digital no Brasil. Tendências, desafios e oportunidades: resultado de pesquisas online**, Embrapa, 2020. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1127064/agricultura-digital-no-brasil-tendencias-desafios-e-oportunidades-resultados-de-pesquisa-online

BOLFE, E. L.; BARBEDO, J. G. A.; MASSRUHÁ, S. M. F. S.; SOUZA, K. X. S. de; ASSAD, E. D. **Desafios, tendências e oportunidades em agricultura digital no Brasil**, 2020. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1126283/desafios-tendencias-e-oportunidades-em-agricultura-digital-no-brasil.

BONAVIGO, L.; GUBERT, J. E. **Diagnostico das Secretarias Municipais da Agricultura quanto a Elaboração do Plano Municipal de desenvolvimento Rural (PMDR); região da Associação dos Municípios da Zona da Produção (AMZOP) do estado do Rio Grande do Sul**, EMATER, 2014.

BRASIL, Casa civil da presidência da república: **Guia prático de análise ex post**, volume 2, Brasília, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/downloads/guiaexpost.pdf/view.

BRASIL, Congresso Nacional. Projeto de Lei n° 149/ 2019. Institui a Política Nacional de Incentivo à Agricultura de Precisão, Brasília, 2019d. Disponível em: https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/140314.

BRASIL, Constituição Federal 1988, Atos das Disposições Constitucionais Transitórias Artigo 174. Brasília, 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm.

BRASIL, **Institui o Plano Nacional de Internet das Coisas e dispõe sobre a Câmara de Gestão e Acompanhamento do Desenvolvimento de Sistemas de Comunicação Máquina a Máquina e Internet das Coisas**. Brasília, 2019a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/decreto/d9854.htm

BRASIL, **Estabelece normas de finanças públicas voltadas para a responsabilidade na gestão fiscal e dá outras providências**. Presidência da República Casa Civil. Subchefia para Assunto Jurídicos, Brasília, 2000. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp101.ht.

BRASIL, Lei n° 12.527, de 18 de novembro de 2011. Casa civil, Brasília, 2011.

BRASIL, **Institui o Plano Plurianual da União para o período de 2020 a 2023**, Brasília, 2019b. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/lei/l13971.htm

BRASIL, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, Lei nº 8.171 de 17 de janeiro de 1991, dispõe sobre a política agrícola. Distrito Federal, Brasília, 1991.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), **Agenda estratégica agricultura de precisão 2014 – 2030**, Brasília, 2014. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/tecnologia-agropecuaria/agricultura-de-precisao-1/arquivos-de-agricultura-de-precisao/agenda-estrategica-do-setor-de-agricultura-de-precisao.pdf

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Prêmio Ceres 2019. **Qualidade agropecuárias fórum de inovação para agropecuária e polos de inovação tecnológicos para agropecuária**, Brasília, 2019c. Disponível em: https://enagro.agricultura.gov.br/selecao/arquivos/2LUGARGESTO.pdf

BRASIL, Plano plurianual 2020-2023: Programas finalísticos. Secretaria de avaliação, planejamento, energia e loteria. Secretaria especial de Fazenda, ministério da economia. Brasília, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/planejamento/pt-br/assuntos/planejamento/plano-plurianual/paginas/ppa-2020-2023.

BUZATTO, M. **Alpestre lança Selo de origem agroecológica**. Emater/RS, 2016. Disponível em: http://www.emater.tche.br/site/noticias/detalhe-noticia.php?id=24607#.YEqBdWhKjIV.

CAPELLA, A. C. **Formulação de Políticas Públicas**. Brasília: Enap, 2018. Disponível em: https://repositorio.enap.gov.br/handle/1/3332

COUTO, L. C. **O atendimento dos municípios da mesorregião oeste de minas às exigências da lei de diretrizes orçamentarias**. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal de Alfenas, campus Varginha. Varginha, 163, 2018.

CRISTAL DO SUL, Planejamento e Orçamento Anexo PPA Analítico, 2018-2021, Prefeitura Municipal de Cristal do Sul, 2018.

EMBRAPA, **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**, Brasília, 2018. Disponível em: https://www.embrapa.br/visao/o-futuro-da-agricultura-brasileira

EMBRAPA. **Mapa e MCTIC criam Câmara do Agro 4.0 para levar mais conectividade ao campo**, 2019a. Disponível em: https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/45785396/mapa-e-mctic-criam-camara-do-agro-40-para-levar-mais-conectividade-ao-campo.

EMBRAPA. **Visão 2014-2034: o futuro do desenvolvimento tecnológico da agricultura brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/995649/visao-2014-2034-o-futuro-do-desenvolvimento-tecnologico-da-agricultura-brasileira

ERVAL SECO, Plano Plurianual 2018 a 2021, Prefeitura municipal de Erval Seco, 2017.

FAO. **Realizing the potential of digitization to improve the agrifood system: Proposing a new International Digital Council for Food and Agriculture a concept note**, Roma, 2020. Disponível em: https://openknowledge.fao.org/items/714fbeff-a0a1-4d0b-8fb3-bec59e84f5f2

FEIX, R. D., et al. **Painel do Agronegócio no Rio Grande do Sul-2016. Fundação de Economia e Estatística, Centro de Estudos Econômicos e Sociais, Núcleo de estudos do Agronegócio**, 2016. Disponível: https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/201702/10012701-painel-do-agronegocio-do-rio-grande-do-sul-2016.pdf.

FEIX, R. D.; LEUSIN JUNIOR, S. **Painel do Agronegócio no Rio Grande do Sul**, 2019. Disponível em: https://dee.rs.gov.br/upload/arquivos/202003/02211922-painel-do-agronegocio-no-rs-2019-compactado.pdf

FLORES, A. J.; PRESTES, R. M. **Plano territorial de desenvolvimento rural sustentável-PTDRS território da cidadania do médio alto Uruguai**. 2° ed, ED. Universidade regional integrada (URI), Frederico Westphalen, 2010. Disponível: https://revistas.fw.uri.br/revistadeadm/article/view/810/1349.

FREDERICO WESTPHALEN, Plano Plurianual 2018/2021, Prefeitura Municipal de Frederico Westphalen, 2017.

IBGE, **PAM - Produção Agrícola Municipal**, 2020b. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html

IBGE. Produto Interno Bruto dos Municípios, 2018. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html

IBGE, **Matérias especiais: Uso de internet, televisão e celulares no Brasil, 2022**. Disponível em: https://educa.ibge.gov.br/jovens/materias-especiais/20787-uso-de-internet-televisao-e-celular-no-brasil.html.

IRAI, Plano Plurianual 2018/2021. Prefeitura Municipal de Irai, 2017.

MAPA, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Boletim Técnico de Agricultura de Precisão**. 3° ed, Brasília 2013. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/tecnologia-agropecuaria/agricultura-de-precisao-1/arquivos-de-agricultura-de-precisao/boletim-tecnico-agricultura-de-precisao-2013.pdf/view.

MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (Ed.). **Agricultura digital**: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Embrapa. Brasília, 2020. cap. 16, p. 380-406. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1126213/agricultura-digital-pesquisa-desenvolvimento-e-inovacao-nas-cadeias-produtivas

NOVO TIRADENTE, Plano Plurianual 2018 a 2021 – Prefeitura Municipal de Novo Tiradentes, 2017.

PALMITINHO, Planejamento e Orçamento PPA: 2018-2021, Prefeitura municipal de Palmitinho, 2017.

PINHAL, Plano Plurianual 2018/2021. Prefeitura municipal de Pinhal, 2017.

PINHEIRINHO DO VALE, Plano Plurianual 2018 a 2021. Prefeitura Municipal de Pinheirinho do Vale, 2017.

PLANALTO, Plano Plurianual 2018-2021, Prefeitura municipal de Planalto, 2017.

RODEIO BONITO, Plano plurianual 2018/2021. Prefeitura Municipal de Rodeio Bonito, 2017.

SEBERI, Plano Plurianual 2018/2021, Prefeitura Municipal de Seberi, 2017.

SEPLAG, DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E ESTATISTICA, Porto Alegre, 2019. Disponível em: https://dee.rs.gov.br/inicial.

TAQUARUÇU DO SUL. **Plano Plurianual 2018-2021**, Prefeitura Municipal de Taquaruçu do Sul, 2017.

TRINDADE DO SUL. **Classificação das Ações pelo Programa de Governo PPA – 2018/2021**. Prefeitura Municipal de Trindade do Sul, 2017.

VICENTE DUTRA. **Planejamento e Orçamento 2018-2021**. Prefeitura Municipal de Vicente Dutra, 2017.

VISTA ALEGRE. **Plano Plurianual 2018 a 2021**. Prefeitura Municipal de Vista Alegre 2017.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 16

EFEITO DE SISTEMAS DE MANEJO DE INVERNO NA VARIABILIDADE HORIZONTAL E VERTICAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO

Effect of winter management Systems on horizontal and vertical variability of soil chemical attributes

Thaís Camila Griebler[1]; Antônio Luis Santi[1]; André Felipe de Conti[1], Renan da Rosa[1], Diego Armando Amaro da Silva[1], João Vittor Haefliger Camargo[1], Murilo Santi Treintin[1], Julio Gustavo Buchholz[1]

[1] Universidade Federal de Santa Maria – Campus Frederico Westphalen – Departamento de Ciências Agrárias, BR386 Km Linha 7 de Setembro, 98400000, Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul, Brasil, griebler.thais@acad.ufsm.br, santi.pratica@yahoo.com, renandarosa1@gmail.com, joao.haefliger@acad.ufsm.br, murilo.treintin@acad.ufsm.br, julio.buchholz@acad.ufsm.br.

RESUMO

O trabalho avaliou a influência de diferentes sistemas de manejo de inverno após três anos de cultivo, em uma área sob plantio direto e com uso de agricultura de precisão. Foram testados pousio, culturas em monocultivo como aveia preta, aveia branca, azevém, nabo forrageiro, ervilhaca, tremoço branco, e consórcios dos mesmos. Avaliaram-se densidade do solo, porosidade, resistência à penetração e estabilidade de agregados. Gramíneas em monocultivo reduziram a compactação: aveia preta e branca diminuíram a densidade, enquanto o azevém reduziu a resistência e aprofundou a camada crítica de 2 MPa. O nabo forrageiro e o consórcio, que por sua vez também melhoraram a densidade e a porosidade na camada de 0,10–0,15 m. Os sistemas consorciados mostraram maior eficiência em favorecer a qualidade física do solo. Já o pousio não apresentou benefícios, mantendo a compactação. Os efeitos positivos foram mais expressivos até 0,20 m de profundidade.

Palavras-chave: Compactação do solo. Estrutura do solo. Agricultura de Precisão.

ABSTRACT

The study evaluated the influence of different winter management systems after three years of cultivation, in an area under no-till and using precision agriculture. Fallow, monoculture crops such as black oats, white oats, ryegrass, forage turnip, vetch, white lupin, and their combinations were tested. Soil density, porosity, penetration resistance, and aggregate stability were assessed. Monoculture grasses reduced compaction: black and white oats decreased density, while ryegrass reduced resistance and deepened the critical layer of 2 MPa. Forage turnip and the consortium also improved density and porosity in the layer of 0.10–0.15 m. The intercropping systems showed greater efficiency in enhancing the physical quality of the soil. Fallow, on the other hand, did not present benefits, maintaining compaction. The positive effects were more pronounced up to a depth of 0.20 m.

Keywords: Soil compaction. Soil structure. Precision Agriculture.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura tem passado por uma série de transformações, tornando-se uma atividade que requer cada vez mais o gerenciamento de seus processos produtivos. Dentre essas ferramentas, a agricultura de precisão (AP), relativamente recente no Brasil, tem proporcionado metodologias que permitem o conhecimento detalhado da variabilidade espacial da produção e dos fatores que a definem. Nesse contexto, o avanço da AP também se relaciona a práticas conservacionistas, como o plantio direto, que se beneficia das informações geradas para otimizar o uso do solo, reduzir custos e promover maior sustentabilidade na produção agrícola.

O sistema de plantio direto (SPD), com área plantada significativa no Brasil, é frequentemente utilizado como uma solução para a melhoria de alguns atributos do solo. Entretanto, a ausência de revolvimento a longo prazo, associada à maior intensidade de uso da terra e ao tráfego de máquinas, pode resultar em alterações na qualidade estrutural do solo, acarretando em aumento da compactação, com algumas práticas podendo até acelerar a degradação do solo.

O processo de compactação reduz a macroporosidade e aumenta a resistência do solo à penetração, fazendo com que o sistema radicular se concentre próximo à superfície, tornando a planta mais susceptível a problemas hídricos e com limitada capacidade de absorver nutrientes em camadas subsuperficiais. Assim, do ponto de vista biológico, um solo de boa qualidade física requer equilíbrio entre aeração e retenção de água, assim como resistência à penetração adequada para o crescimento e as funções fisiológicas das raízes.

A escarificação mecânica tem sido sugerida para aliviar a compactação do solo em áreas de SPD consolidado, pois reduz a densidade e melhora a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração de água. No entanto, seu efeito é temporário, exigindo a repetição da operação regularmente. Uma alternativa sustentável é o uso de plantas de cobertura, que possuem capacidade de crescer em solos compactados, formar bioporos estáveis, proteger o solo contra o impacto direto das gotas de chuva, manter adequadas as taxas de infiltração de água, reduzir perdas de água e solo por erosão hídrica e aumentar o armazenamento de água no solo (BRESSAN et al., 2013; CAVALCANTE et al., 2012; SILVA, R. F. et al., 2013; TEIXEIRA et al., 2012; NUNES et al., 2006; FERNANDES et al., 1999).

Estudos indicam que diferentes sistemas de manejo e resíduos culturais influem nos atributos físicos do solo. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de sistemas de manejo de inverno após três anos de cultivo na distribuição espacial horizontal e vertical dos atributos físicos do solo, em área manejada sob SPD com ferramentas de agricultura de precisão, no sul do Brasil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na área experimental da Universidade Federal de Santa Maria, campus do município de Frederico Westphalen, RS, localizada nas coordenadas 27°23'24.33" S e 53°25'39.58" O, com altitude de 483 m. O clima do local é subtropical de primavera úmida (STPU) com temperatura média anual de 18,1ºC, e precipitação pluvial anual média de 1.919 mm bem distribuídos ao longo do

ISBN 978-65-990392-6-3

ano (MALUF, 2000). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, com textura argilosa (66 %) e relevo suave ondulado.

O presente trabalho avaliou diferentes sistemas de manejo de inverno em sistema fatorial (10 x 5), com dez sistemas de manejo de inverno e cinco profundidades de coleta, com dez repetições por sistema em cada profundidade. Os sistemas de manejo de inverno foram implantados, pelo terceiro ano consecutivo, na primeira quinzena do mês de maio, sendo: aveia preta (*Avena strigosa* S. - Ap), aveia branca (*Avena sativa* L. - AB), azevém (*Lolium multiflorum* L. - AZ), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L. - NF), ervilhaca (*Vicia sativa* L. - E), aveia preta + ervilhaca + nabo forrageiro (ApNFE), aveia preta + nabo forrageiro (ApNF), aveia preta + ervilhaca (ApE), tremoço branco (*Lupinus albus* L. - TB) e pousio invernal (vegetação espontânea - PO). O histórico de cultivos e as adubações na área experimental estão especificadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Histórico dos cultivos, práticas de adubação e correção realizadas na área experimental. Frederico Westphalen, RS.

Período	Cultura	Adubação (NPK)	Quantidade (kg ha^{-1})	Forma de aplicação
Inverno	Plantas de cobertura	Calagem **	3500* **	Lanço/Incorporado **
Verão	Feijão	09-25-15 45-00-00	300 250	Linha Lanço
	Milho safrinha	09-25-15 45-00-00	350 250	Linha Lanço
Inverno	Plantas de cobertura	**	**	**
Verão	Feijão	09-25-15 45-00-00	300 250	Linha Lanço
Inverno	Plantas de cobertura	**	**	**

Legenda: (*) Calcário dolomítico PRNT 85%; (**) Sem Adubação (NPK).
Fonte: Autores (2025).

Em cada parcela, foi coletada uma amostra de plantas, com quadro metálico de 0,5 x 0,5 m, sendo secas em estufa (65ºC) até peso constante, de modo estimar o peso da matéria seca (MS) produzida por cada sistema de manejo de inverno.

As amostragens de solo nas áreas estudadas foram realizadas 40 dias após a dessecação das plantas de cobertura do solo, sendo retiradas amostras deformadas nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20 e 0,20-0,25 m. Posteriormente, as amostras foram encaminhadas para análises químicas ao Laboratório de Química do Solo da Universidade Federal de Santa Maria - Campus Frederico Wespthalen, sendo determinados os teores de matéria orgânica do solo (MOS), $pH_{água}$ (1:1), teores disponíveis de P e K (Mehlich^{-1}), Ca e Mg (KCl 1 mol L^{-1}), acidez trocável (Al) e potencial (H+Al), e calculados a relação Ca/Mg, capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m), todas conforme metodologias descritas em Tedesco et al. (1995) e recomendadas pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo (2004).

Os dados foram submetidos à análise exploratória (estatística descritiva), objetivando verificar a posição e dispersão dos dados, e sendo verificada a existência de tendência central (normalidade) dos dados por meio do teste Shapiro-Wilk (W) a p <0,05 (SHAPIRO e WILK, 1965). Com base nos valores de coeficiente de variação

ISBN 978-65-990392-6-3

(CV), a dispersão dos dados foi classificada em: baixa (CV <15%), moderada (15%< CV <35%), e alta variabilidade (CV >35%) (WILDING e DREES, 1983). Foi efetuada a análise da variância e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott ($p<0,05$), conforme Ferreira et al. (2012), além da correlação simples de Pearson entre os atributos analisados, classificados como: fraca (0,1< r <0,3), moderada (0,4< r <06), forte (r >0,7), e ideal (r =1), conforme Dancey e Reidy (2006). Para as análises dos dados foi utilizado o programa estatístico ASSISTAT 7.7.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise descritiva exploratória dos atributos químicos do solo possibilitou verificar que a área experimental apresenta $pH_{água}$ alto, CTC e saturação por bases alta, teores de MOS médios e baixa saturação por Al (Tabela 2) (COMISSÃO..., 2004), não restringindo o desenvolvimento normal das plantas cultivadas sob SPD (FIORIN, 2007; CHERUBIN, 2013).

Tabela 2 – Estatística descritiva dos atributos químicos e físicos do solo em dez sistemas de manejo de inverno em cinco profundidades. Frederico Westphalen, RS.

Variável[2]	Profundidade de amostragem (m)	Parâmetros Estatísticos[1]								
		n	Valores			DP	Coeficientes			Teste W[3]
			Mínimo	Média	Máximo		CV	Cs	Ck	
MOS (g kg^{-1})	0,00 - 0,05	100	17,1	30,0	41,0	2,7	12,27	-0,33	2,22	0,96*
	0,05 - 0,10	100	18,4	25,1	32,1	1,8	9,95	0,39	1,18	0,97*
	0,10 - 0,15	100	16,1	22,2	29,4	2,3	10,56	0,22	0,42	$0,99^{ns}$
	0,15 - 0,20	100	13,6	19,5	27,6	2,6	13,52	0,39	0,54	$0,98^{ns}$
	0,20 - 0,25	100	12,7	18,0	37,6	3,2	17,90	2,39	12,87	0,84*
$pH_{água}$	0,00 - 0,05	100	5,57	6,76	7,57	0,44	6,52	-0,68	-0,13	0,95*
	0,05 - 0,10	100	5,23	6,75	7,65	0,52	7,72	-0,93	0,51	0,93*
	0,10 - 0,15	100	5,40	6,86	7,66	0,50	7,29	-1,03	0,56	0,91*
	0,15 - 0,20	100	5,31	6,73	7,47	0,53	7,93	-0,83	-0,02	0,93*
	0,20 - 0,25	100	5,34	6,64	7,76	0,56	8,44	-0,50	-0,40	0,96*
P (mg dm^{-3})	0,00 - 0,05	100	2,0	16,8	40,4	7,9	47,10	1,02	0,70	0,92*
	0,05 - 0,10	10	1,1	10,5	36,6	5,8	55,61	1,85	4,81	0,85*

ISBN 978-65-990392-6-3

		0								
	0,10 - 0,15	100	1,4	5,2	17,7	3,3	65,14	1,64	2,73	0,84*
	0,15 - 0,20	100	0,8	2,6	14,6	1,8	69,25	3,59	18,94	0,68*
	0,20 - 0,25	100	0,9	2,1	17,3	1,9	91,92	6,28	46,57	0,41*
K (mg dm^{-3})	0,00 - 0,05	100	36	284	520	82	28,82	0,12	0,41	$0,99^{ns}$
	0,05 - 0,10	100	44	162	333	62	38,62	0,48	-0,11	0,97*
	0,10 - 0,15	100	31	112	282	58	51,55	0,88	0,22	0,93*
	0,15 - 0,20	100	25	78	231	47	60,65	1,19	0,84	0,88*
	0,20 - 0,25	100	17	61	353	47	77,18	3,19	15,19	0,71*
Ca ($cmol_c$ dm^{-3})	0,00 - 0,05	100	5,7	9,4	12,2	1,4	15,10	-0,59	-0,32	0,96*
	0,05 - 0,10	100	4,4	8,8	12,5	1,9	21,13	-0,60	-0,46	0,95*
	0,10 - 0,15	100	3,5	7,9	11,1	1,9	23,81	-0,49	-0,51	0,96*
	0,15 - 0,20	100	3,1	6,7	10,0	1,6	23,74	-0,49	-0,49	0,96*
	0,20 - 0,25	100	2,4	5,9	8,4	1,4	23,73	-0,33	-0,47	$0,98^{ns}$
Mg ($cmol_c$ dm^{-3})	0,00 - 0,05	100	3,6	5,4	7,5	0,7	12,22	0,25	1,53	0,96*
	0,05 - 0,10	100	2,9	5,1	6,9	0,9	17,42	-0,49	-0,18	0,96*
	0,10 - 0,15	100	2,5	4,7	7,4	0,8	17,60	-0,47	0,88	0,95*
	0,15 - 0,20	100	2,1	4,1	5,9	0,8	18,86	-0,32	0,16	$0,98^{ns}$
	0,20 - 0,25	100	1,7	3,6	6,1	0,8	21,05	0,02	0,71	$0,98^{ns}$
Al ($cmol_c$ dm^{-3})	0,00 - 0,05	100	0,00	0,01	0,13	0,02	230,98	4,38	26,67	0,48*
	0,05 - 0,10	100	0,00	0,01	0,16	0,03	227,87	3,11	10,71	0,51*
	0,10 - 0,15	100	0,00	0,01	0,12	0,03	212,60	2,42	5,29	0,54*
	0,15 - 0,20	100	0,00	0,02	0,27	0,06	212,88	3,08	9,61	0,52*
	0,20 - 0,25	100	0,00	0,04	0,41	0,08	204,73	2,57	6,21	0,55*

ISBN 978-65-990392-6-3

H+Al ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,00 - 0,05	100	1,2	1,8	4,1	0,6	31,29	1,62	2,39	0,81*
	0,05 - 0,10	100	1,1	1,9	4,4	0,8	40,15	1,45	1,16	0,78*
	0,10 - 0,15	100	1,2	1,9	3,9	0,7	35,86	1,36	0,89	0,82*
	0,15 - 0,20	100	1,2	2,0	3,9	0,6	31,96	1,23	0,64	0,87*
	0,20 - 0,25	100	1,4	2,1	3,8	0,6	29,48	1,09	-0,07	0,84*
CTC ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,00 - 0,05	100	12,8	17,3	21,0	1,7	9,87	-0,41	-0,11	0,98^{ns}
	0,05 - 0,10	100	10,9	16,1	19,4	2,1	13,14	-0,50	-0,77	0,95*
	0,10 - 0,15	100	9,3	14,7	19,4	2,2	15,24	-0,28	-0,54	0,98^{ns}
	0,15 - 0,20	100	8,1	12,9	17,8	2,1	16,52	-0,35	-0,32	0,97*
	0,20 - 0,25	100	7,4	11,8	19,4	2,2	19,10	0,26	0,41	0,98^{ns}
V (%)	0,00 - 0,05	100	74	89	94	4	5,02	-1,57	1,82	0,80*
	0,05 - 0,10	100	65	88	94	7	8,08	-1,51	1,33	0,76*
	0,10 - 0,15	100	65	87	93	7	8,61	-1,43	0,97	0,79*
	0,15 - 0,20	100	54	84	93	9	10,51	-1,50	1,46	0,80*
	0,20 - 0,25	100	53	82	92	10	12,02	-1,26	0,46	0,82*
m (%)	0,00 - 0,05	100	0,0	0,0	0,8	0,1	218,95	3,39	15,20	0,53*
	0,05 - 0,10	100	0,0	0,1	1,9	0,3	253,24	3,55	14,03	0,46*
	0,10 - 0,15	100	0,0	0,2	1,6	0,4	230,86	2,72	6,95	0,50*
	0,15 - 0,20	100	0,0	0,4	5,9	1,0	253,61	3,60	13,45	0,45*
	0,20 - 0,25	100	0,0	0,7	7,9	1,6	231,67	2,85	7,88	0,49*
Relação Ca/Mg	0,00 - 0,05	100	1,09	1,76	2,24	0,20	11,42	-0,72	1,20	0,96*
	0,05 - 0,10	100	0,92	1,74	2,63	0,24	14,10	0,03	2,88	0,94*
	0,10 - 0,15	100	0,70	1,68	2,53	0,31	18,53	-0,64	2,13	0,93*
	0,15 - 0,20	10	0,90	1,65	2,28	0,2	16,1	-	0,3	0,99^{n}

ISBN 978-65-990392-6-3

		0				7	4	0,04	4	s
	0,20 - 0,25	10 0	0,54	1,60	3,13	0,3 7	23,2 6	0,50	3,2 3	0,94*

Legenda: (1) Onde: n= número de observações (pontos amostrais); DP= desvio padrão; CV= coeficiente de variação (%); Cs= coeficiente de assimetria; Ck= coeficiente de curtose; (2) MOS= matéria orgânica do solo; CTC= capacidade de troca de cátions; V= saturação por bases; m= saturação por alumínio. (3) Teste W: Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: (*) significativo em níveis de p <0,05 e (ns) não significativo. Quando for significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.
Fonte: Autores (2025).

Os nutrientes P, K, Ca e Mg apresentaram, em média, teores classificados como altos ou muito altos (COMISSÃO..., 2004) até a profundidade de pelo menos 0,10 m, sendo constatada redução dos teores com aumento da profundidade amostrada (Tabelas 2 e 3) semelhante ao trabalho de Corassa et al. (2015), além do aumento da variabilidade dos dados (CV). Este resultado é comum em áreas manejadas sob SPD, onde a aplicação de calcário (Ca e Mg) e as adubações sequenciais em superfície (NPK) resultam na formação de um gradiente vertical de fertilidade (SCHLINDWEIN e ANGHINONI, 2002). No caso do P, o gradiente formado também é condicionado pela baixa mobilidade e concentração natural do nutriente em Latossolos (SCHLINDWEIN, 2003; CORASSA, 2015). Segundo Dalla Nora e Amado (2014), esse gradiente de redução da qualidade química em SPD possui grande importância no RS por ser um dos Estados brasileiros que registra maiores perdas de produção agrícola em decorrência de recorrentes estresses hídricos de variada intensidade.

Tabela 3 – Valores médios dos atributos químicos e físicos do solo em cinco profundidades sob dez sistemas de manejo de inverno. Frederico Westphalen, RS.

Atributos químicos do solo em profundidade																									
Prof. (m)	MOS		pH		P		K		Ca		Mg		Al		H+Al		CTC		V		m		Relação	
	g kg^{-1}		H_2O		---- mg dm^{-3} ----				---------- $cmol_c$ dm^{-3} ----------										---- % ----				Ca/Mg	
0,00 - 0,05	30,0	a[1]	6,76	b	16,7	a	284	a	9,4	a	5,4	a	0,01	c	1,8	c	17,3	a	89	a	0,0	c	1,76	a
0,05 - 0,10	25,1	b	6,75	b	10,5	b	162	b	8,8	b	5,1	b	0,01	c	1,9	c	16,1	b	88	b	0,1	c	1,74	a
0,10 - 0,15	22,2	c	6,86	a	5,2	c	112	c	7,9	c	4,7	c	0,01	c	1,9	c	14,7	c	87	c	0,2	c	1,68	b
0,15 - 0,20	19,4	d	6,73	b	2,7	d	78	d	6,7	d	4,1	d	0,02	b	2,0	b	12,9	d	84	d	0,4	b	1,65	b
0,20 - 0,25	18,0	e	6,64	b	2,1	d	61	e	5,9	e	3,6	e	0,04	a	2,1	a	11,8	e	82	e	0,7	a	1,60	b

Legenda: (1) Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott (p≤ 0,05).
Fonte: Autores (2025).

Em relação a dispersão dos dados (Tabela 2), com base nos valores de CV, verificou-se que a MOS, $pH_{água}$ e saturação por bases, apresentaram baixa dispersão (CV <15%), concordando com estudos anteriores (AMADO et al., 2009; CHERUBIN, 2013). No entanto, apesar dos dados de $pH_{água}$ e saturação por bases apresentarem baixa dispersão, indicaram falta de normalidade nos dados, com assimetrias negativas (Cs <0) e distribuições platicúrticas (Ck <0) ou leptocúrticas (Ck >0), também observados por Dalchiavon et al. (2012) e Cherubin (2013). Os teores de P e K

apresentaram alta dispersão dos dados (CV >35%), o mesmo que o constatado por Amado et al. (2009), com fortes assimetrias positivas para os valores de P, e para K nas camadas subsuperficiais, seguindo tendência de distribuições leptocúrticas.

Já para Ca e Mg, a dispersão dos dados foi moderada em todas as camadas, assim como observado por Bottega et al. (2013), apresentando normalidade apenas nas camadas inferiores, ocorrendo de forma semelhante na relação Ca/Mg e a CTC, porém com dispersões de fraca a moderada, com assimetrias predominantemente negativas fracas e distribuição platicúrtica para Ca e CTC, e assimetrias negativas/positivas fracas e distribuição leptocúrticas para Mg e relação Ca/Mg. Os teores de Al trocável e a saturação pelo mesmo (m) apresentaram altíssima variabilidade nos dados, com CV superiores a 200%, devido ao fato de haver presença ou ausência (muitos valores zero) do elemento em algumas camadas e sistemas, dessa forma apresentando o desvio padrão (DP) maior que a média dos dados, sendo mais elevadas nas camadas inferiores, devido a menor saturação por bases em profundidade (Tabelas 2 e 3). De forma diferente, a acidez potencial (H+Al) apresentou dispersão moderada dos dados, não havendo normalidade destes.

Os sistemas de manejo de inverno contribuíram de forma diferente no teor de MOS na camada superficial do solo (0,00 - 0,05 m), destacando os maiores valores nos sistemas com Ap, AZ e o consórcio de Ap+E (Tabela 4), corroborando com os resultados encontrados de vários pesquisadores (FABIAN, 2009), com os sistemas TB e PO apresentando os menores valores observados. Isto evidencia que a manutenção dos resíduos vegetais, principalmente de gramíneas com alta relação C/N, tende a aumentar a MOS, enquanto que resíduos culturais de menor relação C/N (leguminosas ou crucíferas) tendem a manter os teores ao longo do tempo, em níveis próximos aos do pousio invernal (PO). Além disso, a MOS apresentou forte correlação com os atributos P, K, CTC, assim como moderada para Ca e moderada-forte para Mg (Tabela 5), evidenciando sua importância como reserva de nutrientes no solo.

Para os teores disponíveis de P no solo, notou-se um aumento nos valores na camada superficial quando utilizados sistemas como NF, E e ApE, sendo possível observar, que o primeiro sistema, promoveu aumento nas três primeiras camadas superficiais. Isto se deve provavelmente a ciclagem e a capacidade de absorção de P pelo NF, além da rapidez no processo de liberação no solo, devido a menor relação C/N e C/P, semelhante a E (CASALI et al., 2011), acelerando a mineralização dos resíduos da parte aérea e radicular do NF, e aumentando a biodisponibilidade de P no solo, sendo um fator primordial para a justificativa de uso desta planta de cobertura em sistemas de cultivos para aumentar a disponibilidade de P, associado a ciclagem de N.

Ainda, pode-se observar que as gramíneas apresentaram menores valores de P, seguindo a tendência até mesmo em consórcio com NF e E (ApNFE) na camada superficial, além dos demais consórcios nas camadas de 0,05 - 0,10 e 0,10 - 0,15 m, devido a alguns fatores, como os menores teores de P na fitomassa e no solo cultivado com Ap, em relação ao NF solteiro ou consorciado com Ap ou centeio (MARTINS, 2013), e a imobilização de P proporcionada pelos resíduos com menor relação C/N e C/P (GIACOMINI et al., 2003a; CASALI et al., 2011), não possibilitando o aumento da disponibilidade no solo.

Tabela 4 – Valores dos atributos químicos e físicos analisados em dez sistemas de manejo de inverno em cinco profundidades, Frederico Westphalen, RS.

Atributos químicos do solo																																			
---------- 0,00 - 0,05 m----------																																			
Sistema de manejo	MOS			pH		P			K			Ca			Mg			Al			H+Al			CTC			V			m			Relação		
	g kg^{-1}			H_2O		---- mg dm^{-3} ----						---------- cmol$_c$ dm^{-3} ----------															---- % ----						Ca/Mg		
Ap	30,9	a[1]		6,41	b	10,7	b		299	a		7,8	c		5,1	b		0,0	ns		2,6	a		16,3	c		84	c		0,0	ns		1,6	b	
AB	30,4	b		6,13	b	13,6	b		312	a		7,1	c		4,7	b		0,0			2,8	a		15,4	c		82	c		0,0			1,5	b	
AZ	30,7	a		6,64	a	14,7	b		233	c		8,7	b		5,2	b		0,0			2,1	b		16,6	b		87	b		0,0			1,7	b	
NF	29,6	b		6,89	a	20,6	a		270	b		9,6	a		5,0	b		0,0			1,7	c		17,0	b		90	a		0,0			1,9	a	
E	30,4	b		6,94	a	18,1	a		297	b		9,7	a		5,4	a		0,0			1,6	c		17,4	a		91	a		0,0			1,8	a	
ApNFE	30,1	b		6,72	a	14,1	b		317	a		10,1	a		5,4	a		0,0			1,6	c		17,9	a		91	a		0,0			1,9	a	
ApNF	29,6	b		6,91	a	17,5	a		278	b		10,2	a		5,7	a		0,0			1,5	c		18,1	a		92	a		0,0			1,8	a	
ApE	31,7	a		7,03	a	20,4	a		349	a		10,5	a		5,6	a		0,0			1,4	c		18,4	a		92	a		0,0			1,8	a	
TB	28,2	b		7,01	a	19,1	a		249	b		9,8	a		5,7	a		0,0			1,4	c		17,5	a		92	a		0,0			1,7	b	
P	28,1	b		6,95	a	18,2	a		242	c		10,5	a		5,8	a		0,0			1,4	c		18,3	a		92	a		0,0			1,8	a	
---------- 0,05 - 0,10 m ----------																																			
Ap	23,8	ns		6,07	c	7,8	b		152	b		6,1	d		4,2	b		0,1	a		3,3	a		14,0	d		76	c		0,6	ns		1,5	b	
AB	25,0			6,05	c	9,3	b		168	b		6,2	d		4,0	b		0,1	a		3,0	a		13,6	d		78	c		0,5			1,6	b	
AZ	25,0			6,63	b	11,7	b		155	b		7,8	c		4,4	b		0,0	b		2,2	b		14,8	c		85	b		0,1			1,7	b	
NF	25,0			6,75	b	12,7	a		140	b		8,7	b		5,2	a		0,0	b		1,7	c		16,0	b		89	a		0,0			1,7	b	
E	25,3			6,93	b	9,9	b		183	b		9,1	b		5,4	a		0,0	b		1,6	c		16,6	b		90	a		0,0			1,7	b	
ApNFE	24,7			6,82	b	9,8	b		160	b		10,1	a		5,4	a		0,0	b		1,6	c		17,5	b		91	a		0,0			1,9	a	
ApNF	26,1			7,10	a	9,7	b		154	b		9,7	a		5,7	a		0,0	b		1,5	c		17,3	b		91	a		0,0			1,7	b	
ApE	25,0			7,16	a	12,5	b		197	a		10,2	a		5,3	a		0,0	b		1,5	c		17,5	b		91	a		0,0			1,9	a	
TB	24,8			6,90	b	11,3	b		142	b		9,8	a		5,4	a		0,0	b		1,5	c		17,1	b		91	a		0,0			1,8	a	
P	26,2			7,08	a	10,0	b		162	b		10,4	a		5,8	a		0,0	b		1,5	c		18,1	b		92	a		0,0			1,8	a	
---------- 0,10 - 0,15 m----------																																			
Ap	21,1	ns		6,04	b	2,9	b		96	ns		5,4	c		3,8	b		0,1	a		3,1	a		12,5	c		75	c		0,7	a		1,5	b	
AB	20,7			6,20	b	4,0	b		109			5,3	c		3,9	b		0,1	a		2,9	a		12,4	c		77	c		0,7	a		1,4	b	
AZ	22,7			6,77	a	5,6	b		111			7,0	b		4,5	a		0,0	b		2,1	b		13,9	b		85	b		0,0	b		1,6	b	
NF	22,4			7,08	a	8,0	a		108			8,4	a		5,1	a		0,0	b		1,6	c		15,4	a		90	a		0,0	b		1,6	b	
E	22,2			7,10	a	6,2	b		138			8,3	a		5,1	a		0,0	b		1,6	c		15,4	a		90	a		0,0	b		1,6	b	
ApNFE	22,1			6,95	a	4,3	b		115			9,1	a		4,9	a		0,0	b		1,6	c		15,9	a		90	a		0,0	b		1,9	a	
ApNF	22,3			7,13	a	4,8	b		102			8,5	a		5,0	a		0,0	b		1,5	c		15,3	a		90	a		0,0	b		1,7	a	
ApE	22,6			7,13	a	5,5	b		133			8,9	a		5,1	a		0,0	b		1,4	c		15,7	a		91	a		0,0	b		1,8	a	
TB	22,3			7,11	a	4,8	b		95			9,3	a		4,9	a		0,0	b		1,5	c		15,9	a		91	a		0,0	b		1,9	a	
P	23,1			7,10	a	5,5	b		114			9,1	a		5,0	a		0,0	b		1,5	c		15,9	a		91	a		0,0	b		1,8	a	
---------- 0,15 - 0,20 m----------																																			
Ap	18,2	ns		6,04	b	2,0	ns		63	ns		4,6	c		2,9	b		0,1	a		3,0	a		10,7	c		72	c		1,5	a		1,6	ns	
AB	18,7			5,93	b	1,4			58			5,0	c		3,1	b		0,1	a		3,1	a		11,3	c		73	c		2,1	a		1,6		
AZ	18,5			6,82	a	2,2			72			6,3	b		4,1	a		0,0	b		2,1	b		12,7	b		83	b		0,2	b		1,6		
NF	19,9			6,99	a	3,8			90			7,2	b		4,4	a		0,0	b		1,6	b		13,4	a		88	a		0,1	b		1,6		
E	19,1			6,92	a	2,6			105			6,9	b		4,4	a		0,0	b		1,7	b		13,3	a		87	a		0,1	b		1,6		
ApNFE	20,2			6,91	a	3,3			68			6,9	b		4,4	a		0,0	b		1,6	b		13,1	a		88	a		0,1	b		1,6		
ApNF	19,4			6,99	a	2,3			70			7,2	b		4,3	a		0,0	b		1,6	b		13,3	a		88	a		0,1	b		1,6		
ApE	20,1			6,92	a	3,5			104			8,2	a		4,4	a		0,0	b		1,6	b		14,5	a		89	a		0,1	b		1,8		
TB	19,5			6,88	a	2,9			67			6,9	b		4,2	a		0,0	b		1,8	b		13,1	a		86	a		0,1	b		1,6		
P	20,4			6,91	a	2,5			80			8,0	a		4,6	a		0,0	b		1,8	b		14,6	a		88	a		0,1	b		1,8		

Legenda: (1) Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott (p≤ 0,05), e (ns) não significativo (p≤ 0,05).
Fonte: Autores (2025).

Tabela 4 – Valores dos atributos químicos analisados em dez sistemas de manejo de inverno em cinco profundidades, Frederico Westphalen, RS. (conclusão)

Profundidade (m)																														
---------- 0,20 - 0,25 m----------																														
Sistema de manejo	MOS			pH			P			K			Ca			Mg			Al			H+Al			CTC			V			m			Relação		
	g kg^{-1}			H_2O			---- mg dm^{-3} ----						---------- cmol$_c$ dm^{-3} ----------												---- % ----						Ca/Mg		
Ap	16,5	b	1	6,04	b		1,6	ns		42	ns		4,6	b		3,1	b		0,2	a		3,1	a		10,9	b		72	c		2,6	ns		1,6	ns	
AB	16,1	b		5,83	b		1,5			48			4,6	b		3,0	b		0,2	a		3,0	a		10,7	b		72	c		2,8			1,8		
AZ	16,0	b		6,57	a		1,5			47			5,3	b		3,6	a		0,1	b		2,3	b		11,3	b		80	b		0,8			1,6		
NF	20,1	a		6,82	a		3,6			93			5,9	a		4,1	a		0,0	c		1,9	c		12,1	a		84	a		0,1			1,6		
E	17,2	b		6,91	a		1,7			77			6,2	a		3,8	a		0,0	c		1,8	c		12,0	a		85	a		0,1			1,6		
ApNFE	17,5	b		6,92	a		2,2			49			5,9	a		3,8	a		0,0	c		1,8	c		11,6	a		85	a		0,1			1,6		
ApNF	17,8	b		6,95	a		1,9			57			6,5	a		3,9	a		0,0	c		1,8	c		12,3	a		85	a		0,1			1,7		
ApE	18,8	a		6,81	a		3,1			79			6,7	a		3,8	a		0,0	c		1,9	c		12,6	a		85	a		0,1			1,8		
TB	18,8	a		6,70	a		2,2			47			5,9	a		3,8	a		0,0	c		2,0	c		11,8	a		83	a		0,1			1,6		
P	20,9	a		6,86	a		1,4			66			7,0	a		4,5	a		0,0	c		2,0	c		13,7	a		85	a		0,1			1,6		

Legendas: (1) Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott (p≤ 0,05), e (ns) não significativo (p≤ 0,05).
Fonte: Autores (2025).

Já os teores disponíveis de K no solo diferiram entre os sistemas de manejo de inverno apenas nas duas primeiras camadas superficiais do solo, destacando-se os maiores valores na camada de 0,00 - 0,05 m nos sistemas com gramíneas Ap e AB, e nos consórcios ApNFE e ApE. Não por acaso, esses sistemas de manejo de inverno são alguns dos que apresentam maiores produções de MS, produzindo no mínimo 5,02 Mg ha^{-1} (AB), chegando até 8,10 Mg ha^{-1} com o consórcio ApE, que por sua vez também apresentou os maiores valores de K disponível, também na camada de 0,05 - 0,10 m.

Giacomini et al. (2003b) relataram que o acúmulo de K por gramíneas, enquanto alguns trabalhos de pesquisa (SANTI et al., 2003; BORKERT et al., 2003; MELO et al., 2011) destacam a importância da ciclagem de K fornecida por sistemas que contenham gramíneas, principalmente Ap, devido a maior produção de MS, sendo está uma importante estratégia para reduzir as perdas por lixiviação na entressafra de culturas comerciais, devido ao sistema radicular profundo.

Da mesma forma, nota-se que os sistemas AZ e PO apresentaram menores teores de K em superfície no solo, provavelmente devido a baixa produção de MS, sendo que, os valores de MS variaram de 3,37 Mg ha^{-1} para AZ, a apenas 1,47 Mg ha^{-1} no PO, mostrando que o K possui uma dinâmica diferenciada dos demais nutrientes, se tornando prontamente disponível no solo a partir da degradação dos resíduos culturais. Melo et al. (2011) também encontrou desfavorecimento do PO nos teores de K observados no solo, devido a pouca produção de MS, e o baixo conteúdo deste nutriente na parte área da vegetação espontânea, além da pouca palhada favorecer a lixiviação do K. Quanto aos teores das bases Ca e Mg no solo, relação Ca/Mg, e consequentemente a CTC, V, e até mesmo o pH$_{água}$ houve um comportamento muito semelhante, que persistiu desde as camadas mais superficiais até as maiores

profundidades analisadas, sendo observado teores menores em sistemas compostos por gramíneas solteiras, como Ap, AB, e por vezes, AZ. Além disso, a rotação de culturas e o provimento de resíduos vegetais sobre o solo no SPD, promovem aumento da atividade biológica (DE-POLLI e CHADA, 1989), aumentam a CTC, bem como, melhoram a disponibilidade de nutrientes (ELTZ et al., 1989), alterando os valores de $pH_{água}$ e diminuindo a saturação por Al. Assim como encontrado neste trabalho, Amaral et al. (2000) também observaram acréscimo de $pH_{água}$ proporcionado pela cultura da ervilhaca, bem como o decréscimo de $pH_{água}$ quando utilizada a aveia preta, ao contrário do que foi relatado por Caires et al. (2006), que não encontraram efeitos da aveia preta no pH do solo.

Por consequência dos valores de $pH_{água}$, CTC e V encontrados neste presente trabalho (Tabela 4), os valores de Al, m, e H+Al apresentaram-se baixos ou até mesmo inexistentes, sendo desconsideráveis para serem interpretados, seguindo a tendência de apresentar um gradiente inverso aos demais elementos observados, aumentando sensivelmente conforme a profundidade de solo analisada (Tabela 3).

4 CONCLUSÃO

O sistema NF elevou os teores de P no solo nas três camadas mais superficiais avaliadas (0,00 - 0,05; 0,05 - 0,10 e 0,10 - 0,15 m) quando utilizado de forma solteira, enquanto que as gramíneas (Ap, AB e AZ), proporcionaram redução nos teores de P no solo, imobilizando/reduzindo o P ciclado pelo NF quando consorciadas com esta, não sendo observados benefícios aos teores de P no solo.

Sistemas de manejo com maior produção de MS, proporcionaram aumento nos teores de K nas camadas superficiais do solo, estimulando a utilização de sistemas consorciados, em razão da maior produção de resíduos culturais apresentada nestes sistemas.

O uso de sistemas de monoculturas de gramíneas (Ap, AB e AZ), apesar de apresentar teores de K e MOS elevados, ocasionaram, em algumas camadas, o decréscimo dos teores de P, $pH_{água}$, Ca, Mg, CTC e da saturação por bases, caracterizando, desta maneira, sistemas que devem ser evitados em longo prazo, devendo ser rotacionados ou consorciados com outras espécies.

O sistema de manejo de pousio invernal (PO) é o que produz menos resíduos culturais (MS), resultando em menor extração/ciclagem de nutrientes, promovendo acúmulo superficial do P proveniente da adubação das culturas de verão, e, ocasionando maiores perdas de nutrientes facilmente lixiviáveis, como o K, pela falta de proteção superficial.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADO, T. J. C. et al. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 831-843, 2009.

AMARAL, A. S. et al. Resíduos vegetais na superfície do solo afetam a acidez do solo e a eficiência do herbicida Flumetsulam. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 5, p. 789-794, set./out. 2000.

ANDREOLA, F. et al. Propriedades químicas de uma Terra Roxa Estruturada influenciadas pela cobertura vegetal de inverno e pela adubação orgânica e mineral. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 609-620, 2000.

BRESSAN, S. B. et al. Plantas de cobertura e qualidade química de Latossolo Amarelo sob plantio direto no cerrado maranhense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 4, p. 371–378, 2013.

BOTTEGA, E. L. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.

CAIRES, S. F. et al. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 87-98, 2006.

CASALI, C. A. et al. **Mineralização das formas de fósforo do tecido de plantas de cobertura**. Piracicaba: Informações Agronômicas - IPNI. set. 2011. p. 21-24. (Documentos, n. 135)

CAVALCANTE, V. S. et al. Biomassa e extração de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 521–528, 2012.

CHERUBIN, M. R. **Eficiência de malhas amostrais utilizadas na caracterização de atributos químicos em Latossolos manejados com Agricultura de Precisão**. 2013. 101 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2013.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2004. 400p .

CORASSA, G. M. **Manejo por ambiente: atributos de solo e desempenho de cultivares de soja**. 2015. 124 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2015.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C. Estratégias de manejo para o incremento da eficiência do uso da água no Sistema Plantio Direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 142/143, p. 19-29, jul./out. 2014.

DALCHIAVON, F. C. et al. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob Sistema Plantio Direto. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, p. 453-461, 2012.

DANCEY C. P.; REIDY J. **Estatística sem matemática para psicologia: usando SPSS para Windows**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 608 p.

DE-POLLI, H.; CHADA, S. S. Adubação verde incorporada ou em cobertura na produção de milho em solo de baixo potencial de produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 287-293, 1989.

ELTZ, F. L. P.; PEIXOTO, R. T. G.; JASTER, F. Efeito de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno Álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 259–267, 1989.

FABIAN, A. J. **Plantas de cobertura: efeito nos atributos do solo e na produtividade de milho e soja em rotação**. 2009. 83 p. Tese (Doutorado em Agronomia - Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

FERNANDES, M. F.; BARRETO, A. C.; EMÍDIO FILHO, J. Fitomassa de adubos verdes e controle de plantas daninhas em diferentes densidades populacionais de leguminosas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 1593-1600, 1999.

FERREIRA, D. F.; FILHO, A. C.; LÚCIO, A. D. Procedimentos estatísticos em planejamentos experimentais com restrições na casualização. **Boletim informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.3, p. 16-19, set./dez. 2012.

FIORIN, J. E. **Manejo e Fertilidade do Solo no Sistema Plantio Direto**. Passo Fundo: Berthier, 2007. 184 p.

GIACOMINI, S. J. et al. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 9, p. 1097-1104, 2003a.

GIACOMINI, S. J. et al. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 325-334, 2003b.

MALUF, J. R. T. Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, p. 141-150, 2000.

MARTINS, R. P. **Decomposição e mineralização de nutrientes de resíduos de plantas de cobertura em solo cultivado com cebola (*Allium cepa* L.)**. 2013. 69 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

NUNES, U. R. et al. Covering crops straw production and common bean productivity in no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 943-948, 2006.

SANTI, A.; AMADO, T. J. C.; ACOSTA, J. A. A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I - Influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1075-1083, 2003.

SCHLINDWEIN, J. A. **Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto**. 2003. 169 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Tamanho da subamostra e representatividade da fertilidade do solo no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, v. 6, p. 963-968, 2002.

ISBN 978-65-990392-6-3

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TEIXEIRA, M. B. et al. Decomposição e ciclagem de nutrientes dos resíduos de quatro plantas de cobertura do solo. **IDESIA**, Arica, v. 30, n. 1, jan.-abr. 2012.

WILDING, L. P.; DREES, L. R. Spatial variability and pedology. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; HALL, G. F. (Eds). **Pedogenesis and Soil Taxonomy** - I. Concepts and Interactions.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 17

Potencial de Sequestro de Carbono a Partir da Intensificação Agrícola no RS

Carbon sequestion potential from agricultural instensification in RS

Thaís Camila Griebler[1]; Antônio Luis Santi[1]; Renan da Rosa[1], Gilvan Moisés Bertollo[1], Willian José Junges[1], Amanda Fornari [1], Vitor Eduardo Schardong [1], Julio Gustavo Buchholz[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria – Campus Frederico Westphalen – Departamento de Ciências Agrárias, BR386 Km Linha 7 de Setembro, 98400000, Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul, Brasil,
griebler.thais@acad.ufsm.br, santi.pratica@yahoo.com, renandarosa1@gmail.com, gilvan.bertollo@ufsm.br, willian.junges@acad.ufsm.br, amanda.fornari@acad.ufsm.br, schardong.vitor@acad.ufsm.br, julio.buchholz@acad.ufsm.br.

RESUMO

A agricultura brasileira enfrenta o desafio de aumentar a produção de alimentos de forma sustentável, e o solo tem papel crucial no sequestro de carbono (C), contribuindo para mitigar gases de efeito estufa. Este trabalho realizou revisão bibliográfica sobre o potencial de sequestro de C em áreas de plantio direto no Rio Grande do Sul, além de estimar a área em pousio no inverno e identificar culturas de maior aporte de C. Dados do IBGE mostraram que, nos últimos 10 anos, em média 5,11 milhões de hectares ficam em pousio no inverno. A variação nos teores de C na biomassa foi pequena, mas a produção de biomassa seca apresentou grandes diferenças devido a solo, clima e região. O consórcio aveia-preta + nabo-forrageiro destacou-se pelo alto potencial de produção de biomassa seca (7,61 Mg.ha^{-1}). Entre 20,22% e 23,97% do C da biomassa permanece estocado no solo ao longo do tempo. Caso o pousio fosse substituído pelo consórcio, poderiam ser sequestrados cerca de 3,22 milhões de Mg.ha^{-1} de C no inverno.

Palavras-chaves: Adição de Carbono. Plantas de cobertura. Agricultura de Precisão.

ABSTRACT

Brazilian agriculture faces the challenge of increasing food production in a sustainable way, with soil playing a crucial role in carbon (C) sequestration and greenhouse gas mitigation. This study carried out a literature review on the potential for C sequestration in no-till areas in Rio Grande do Sul, estimated the area left fallow during winter, and identified crops with the greatest C input. IBGE data showed that, over the last 10 years, an average of 5.11 million hectares remained fallow in winter. Variation in C content of biomass was small, but total dry biomass production varied greatly due to differences in soil, climate, and region. The black oat + forage radish consortium stood out for its high dry biomass production potential (7.61 Mg.ha^{-1}). Between 20.22% and 23.97% of the C from crop biomass remains stored in the soil over time. If fallow areas were replaced by this consortium, approximately 3.22 million Mg.ha^{-1} of C could be sequestered during winter.

Keywords: Carbon Addition. Cover Crops. Precision Agriculture.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

Segundo Ferreira (2021), a produção de grãos no Sul do Brasil iniciou-se nos anos de 1900 a 1965. Neste período, a atividade agrícola era, principalmente, a de subsistência. O manejo agrícola era precário, com uso de tração animal e algumas práticas degradantes ao solo, como às queimadas, em que reduzia parte da matéria orgânica do solo. A principal atividade econômica era focada no setor agropecuário, com a pecuária, e nas culturas do milho, trigo, feijão e lentilha.

A mudança de campo nativo, que era muito presente no RS, para adoção de práticas agrícolas, afetou significativamente os teores de carbono (C) no perfil do solo, devido ao uso intensivo de maquinário, o que ocasionavam em grandes perdas de C do sistema (Ferreira, 2014). Segundo Boddey, (2012) o setor do agronegócio foi responsável por mais de 20% das emissões totais de gases do país.

É de conhecimento geral, que a população mundial está tendo um aumento anualmente, e a produção de alimentos deve acompanhar esse ritmo para que se possa ter alimento para toda a população. Porém, tão importante quanto produzir mais, é também, produzir de forma sustentável. A sociedade está cada vez mais crítica quanto a forma de se produzir alimentos. E a frequência que ocorrem as mudanças climáticas a nível mundial está se intensificando a cada ano, sendo que a principal causa apontada para esses acontecimentos, segundo Santi (2007), é justamente a ação do homem sobre o ambiente, o que vem contribuindo para aumento nas emissões de gases de efeito estufa.

Por isso, conforme Denardin (2012) também apontou, o principal desafio atual da agricultura brasileira, é seguir estimulando o crescimento, produzindo mais e sendo cada vez mais rentável, e ao mesmo tempo produzir alimentos de forma sustentável, e aliado a isso reduzir as taxas de emissões de gases do efeito estufa.

O solo é dado como uma importantíssima ferramenta na dinâmica do C no ambiente, e tem potencial de sequestrar o principal gás responsável pelo efeito estufa, que é o gás carbônico (CO_2). Sendo que feito um manejo correto do solo do qual é utilizado para a agricultura, pode contribuir na mitigação desses gases, principalmente pelo potencial de sequestro de carbono pelas culturas (Santi, 2007).

Uma prática que tem potencial em adicionar mais resíduos ao solo e consequentemente sequestrar mais C é o uso de plantas de coberturas de outono/inverno em áreas de pousio, onde se tem mínimos acréscimos de resíduos. Sabe-se que anualmente ainda são deixados milhares de hectares sobre pousio no inverno no Rio Grande do Sul. Para comprovar que a agricultura tem capacidade em sequestrar C e para poder usar isso em possíveis créditos, é necessário saber quais são as culturas com maiores teores do elemento em sua palhada, e que consequentemente possuem maior capacidade em sequestrar o C da atmosfera de baixa intensificação sustentável.

O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica sobre o potencial de sequestro de carbono em áreas de plantio direto no estado do Rio Grande do Sul (RS) e, estimar quantos hectares ficam sobre pousio no outono/inverno anualmente além de verificar quais são as culturas com maior potencial de aportar e sequestrar carbono ao solo.

ISBN 978-65-990392-6-3

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa realizada neste trabalho foi feita a partir de dados secundários, sejam dados disponibilizados em sites governamentais, neste caso, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), ou dados de artigos já publicados que fossem referentes ao tema estudado.

Para encontrar a primeira variável do estudo, onde se buscava saber quantas hectares são deixadas anualmente sob pousio no RS, foi utilizado os dados disponibilizados pela plataforma do IBGE, no banco de tabelas estatísticas, que é o Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). Dentro do banco de tabelas estatísticas foi selecionado o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, focando nos dados do estado do RS. Neste banco de dados do SIDRA, é possível buscar qual foi a produção anual de cada cultura no estado, e quantas hectares foram semeadas de cada cultura.

Foi selecionado quais eram as principais culturas de verão e de inverno semeadas no estado anualmente, levando em consideração os últimos 10 anos. Para descobrir quantas hectares eram deixadas sobre pousio anualmente nestes últimos 10 anos, foi calculado quantas hectares foram semeadas no verão, e quantas hectares foram semeadas no inverno, sendo que a diferença, considera-se áreas que foram deixadas sobre pousio no inverno.

O segundo passo foi analisar quais são as culturas utilizadas no outono e inverno no RS que tem maior potencial em sequestrar C da atmosfera. Para isso, foi feito uma revisão de trabalhos científicos que calcularam os teores de C presentes na biomassa seca que é deixada sobre o solo, pelas principais culturas de outono e inverno cultivadas no estado do RS, trabalhos estes publicados no período de 2012 a 2022, esses dados foram tabelados, e foi calculado a média e o desvio padrão, a fim de definir quais culturas possuem maiores porcentagens de C em sua biomassa seca. Foram selecionados artigos que fizeram seus estudos sob plantio direto.

Em seguida, foi analisado quais culturas utilizadas no outono e inverno no RS tem maior potencial em produzir biomassa seca ao final do seu ciclo. Para isso, semelhante a análise anterior, foi selecionado trabalhos científicos que calcularam a produção de biomassa seca das culturas. Esses dados foram tabelados e calculado a média e desvio padrão. Para a busca dos trabalhos também foi selecionado artigos que fizeram seus experimentos sob plantio direto.

Todos os trabalhos utilizados para o levantamento dos dados foram encontrados a partir de pesquisa em sites de produção cientifica, como google acadêmico, periódicos capes, e mananciais de universidades.

Por fim, foi discutido o potencial de sequestro de C se fossem usadas nas áreas deixadas sobre pousio no inverno as culturas de cobertura que possuem maior potencial em sequestrar o elemento da atmosfera. Sendo que foi considerado que parte da biomassa seca deixada no solo pelas culturas é composta por C, e este foi sequestrado da atmosfera e deixado sobre o solo, porém, apenas parte deste C ficará estocado no solo com o passar do tempo. Por fim, foi buscado dados de pesquisas que fosse possível calcular quanto deste C deixado sobre o solo ao final do ciclo das culturas com o passar do tempo é estocado.

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque (RS) · cotrijal · UFSM

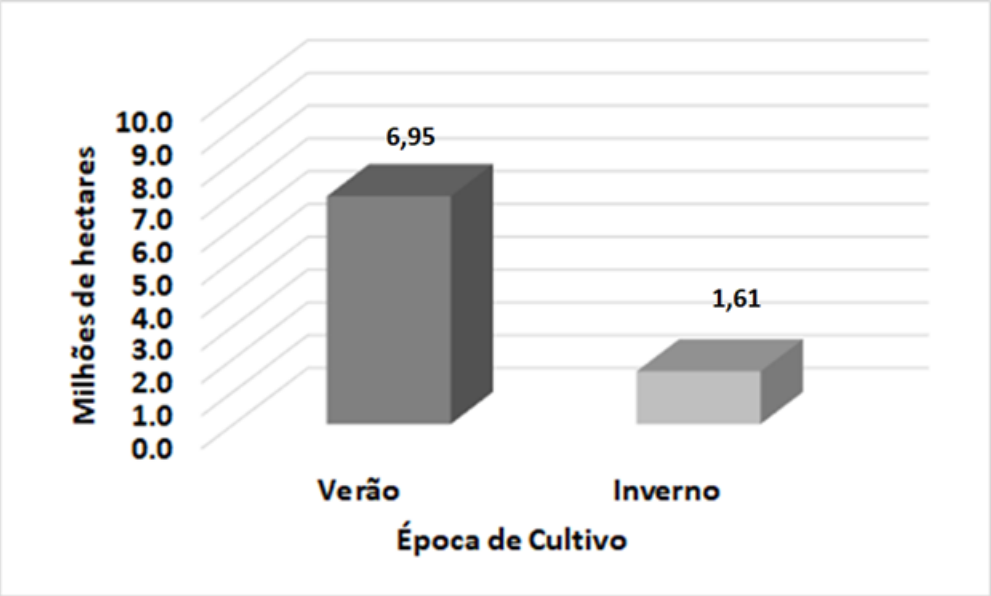
ISBN 978-65-990392-6-3

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi analisado os dados do IBGE, disponibilizados no site oficial (www.ibge.gov.br), com relação a área semeada das principais culturas do RS no ano de 2021, tanto do inverno como do verão, levando em consideração que as principais culturas de inverno no RS são o trigo, aveia, cevada, centeio e triticale, e as principais culturas do verão são soja, milho, feijão, girassol e sorgo, não levando em consideração a cultura do arroz, muito utilizada no RS, porém possui peculiaridades em seus sistemas de cultivo, sendo muitas vezes difícil implantar um SPD e sucessão de culturas em sistemas que se tem o arroz como cultura principal.

Pode-se avaliar que grande parte da área cultivada no RS está sob PD, e não SPD, pelo fato de que a área utilizada no verão não é na mesma proporção que no inverno, logo, se evidencia que não houve rotação nessas áreas, nem mesmo, um sistema de sucessão de culturas. No verão foram semeadas ao todo 6.951.488 de hectares, sendo que no inverno, este número cai para 1.614.893, deste modo, pode-se dizer que no RS no ano de 2021, 5.336.595 hectares ficaram sob pousio no inverno, área esta que poderia ser explorada comercialmente por culturas comerciais como aveia, trigo e triticale, ou incluído plantas de coberturas a fim de melhorias na física e química do solo.

Figura 1: Área semeada no Estado do RS no verão e no inverno no ano de 2021

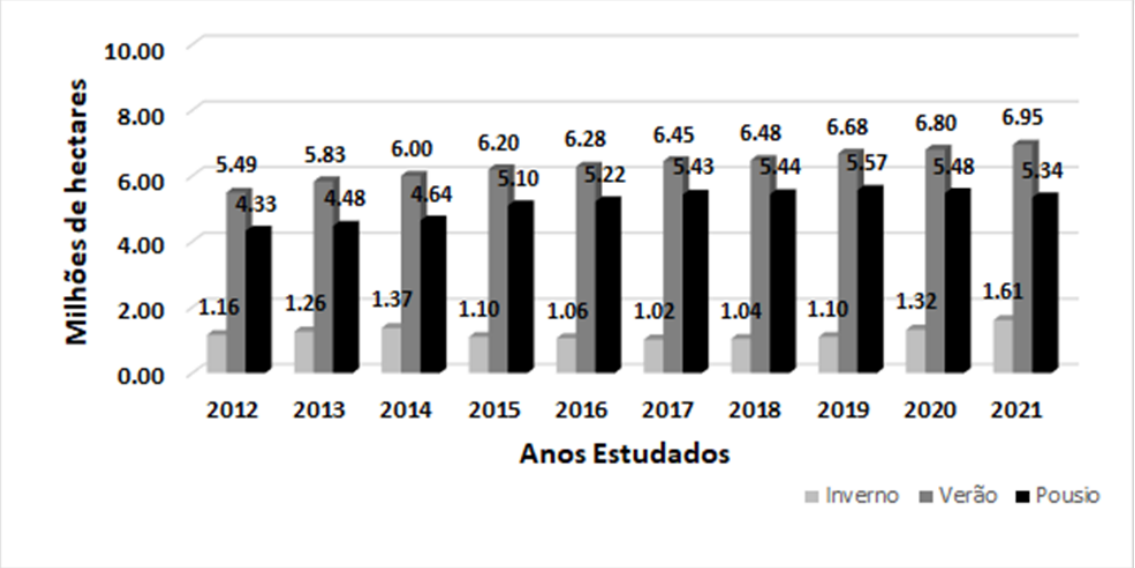


Fonte: Autores (2025).

A fim de verificar se em anos anteriores também se mantinha grandes quantidades de áreas sob pousio, foi analisado não só o ano de 2021, mas os 10 anos anteriores, desde 2012, o montante de área semeada das principais culturas de inverno e verão, seguindo a mesma lógica da análise anterior. Evidenciou-se, levando em consideração os últimos 10 anos (Figura 2), que ficam sob pousio no inverno em média anualmente 5,11 milhões de hectares sob pousio no inverno.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2: Área semeada no estado do RS no verão e no inverno nos últimos 10 anos



Fonte: Autores (2025).

A fim de definir quais culturas potencializam o sequestro de C no solo, a partir de dados secundários de artigos, foi pesquisado valores já encontrados de teores de C na massa seca em g.Kg-¹ das principais culturas de cobertura e de grãos cultivadas no outono/inverno no RS, e a partir disso, saber qual a porcentagem média de C que cada cultura possui em sua palhada deixada sobre o solo. Na tabela 1 pode ser conferido os dados encontrados, divididos por cultura.

Redin (2014) também calculou a porcentagem de C no tecido da cultura do trigo, encontrando um teor de C de 466 g.Kg-¹, o que equivale a uma porcentagem de 46,6 de C na massa seca. Doneda (2013) também fez o mesmo cálculo para o consórcio entre aveia-preta + nabo-forrageiro, encontrando um teor de 400 g.Kg-¹ na massa seca, o que equivale a 40% de C.

Ao analisar os dados, pode-se ver que se tem pouca variação nos teores de C na biomassa obtidos, sendo que independentemente das condições em que foi cultivada determinada cultura, os teores de C no tecido permanecerão com poucas variações, ficando entre 34 a 48,5 g.Kg-¹ Sendo o tremoço-azul (*Lupinus angustifolius)* a cultura com maiores teores de C na biomassa seca, 46,8 g.Kg-¹, demonstrando ser uma cultura com potencial para sequestrar C ao solo.

Isso serve também para a cultura do trigo, segundo Redin (2014), possui uma porcentagem de C na massa seca equivalente a 46,6%, sendo uma cultura que pode sequestrar C ao solo, e ao mesmo tempo pode ser usada como uma cultura comercial no inverno, gerando renda pela comercialização do seu grão.

A porcentagem de C presente na biomassa da cultura é importante para determinarmos quais tem maior potencial de acrescentar C ao solo, mas também aliado a isso, é saber o potencial da cultura em produzir palhada, ou seja, massa seca. Pois, consequentemente, quanto mais palhada ao solo, mais C sequestrado e mais C será estocado ao solo.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 1: Dados de C (g.Kg-¹) para as principais culturas de outono e inverno utilizadas no RS

Cultura	Teor de C (g.Kg-¹)	Porcentagem (%)	Fonte
Avena strigosa Schreb	394	39,4	Ruedell apud Campos (2006)
Avena strigosa Schreb	470	47,0	Gonçalves (1999)
Avena strigosa Schreb	478	47,8	Redin (2014)
Avena strigosa Schreb	422	42,2	Doneda (2013)
Avena strigosa Schreb	410	41,0	Nemirscki (2019)
Avena strigosa Schreb	420	42,0	Ziech (2015)
Avena strigosa Schreb	400	40,0	Ziech (2015)
Média	**427,71**		
Desvio Padrão	**33,23**		
***Raphanus sativus* L.**	340	34,0	Bianchi apud Campos (2006)
***Raphanus sativus* L.**	459	45,9	Redin (2014)
***Raphanus sativus* L.**	395	39,5	Doneda (2013)
***Raphanus sativus* L.**	397	39,7	Nemirscki (2019
***Raphanus sativus* L.**	389	38,9	Ziech (2015)
***Raphanus sativus* L.**	353	35,3	Ziech (2015)
***Raphanus sativus* L.**	485	48,5	Carneiro (2008)
Média	**402,57**		
Desvio Padrão	**52,63**		
Lupinus angustifolius	460	46,0	Gonçalves (1999)
Lupinus angustifolius	476	47,6	Redin (2014)
Média	**468**		
Desvio Padrão	**11,31**		
Vicia sativa	388	38,8	Gonçalves (1999)
Vicia sativa	480	48,0	Redin (2014)
Vicia sativa	420	42,0	Doneda (2013)
Vicia sativa	394	39,4	Nemirscki (2019)
Média	**420,5**		
Desvio Padrão	**42,02**		
Lolium multiflorum Lam.	464	46,4	Redin (2014)
Lolium multiflorum Lam.	418	41,8	Nemirscki (2019
Média	**441**		
Desvio Padrão	**32,52**		
Secale cereale	420	42,0	Doneda (2013)
Secale cereale	474	47,4	Redin (2014)
Secale cereale	415	41,5	Ziech (2015)
Secale cereale	392	39,2	Ziech (2015)
Média	**425,25**		
Desvio Padrão	**34,71**		
AP + EF	412	41,2	Doneda (2013)
AP + EF	412	41,2	Nemirscki (2019
AP + EF	405	40,5	Ziech (2015)
AP + EF	392	39,2	Ziech (2015)
Média	**405,25**		
Desvio Padrão	**9,42**		
AP + EF + N	399	39,9	Ziech (2015)
AP + EF + N	394	39,4	Ziech (2015)
Média	**396,5**		
Desvio Padrão	**3,53**		

Legenda: AP + EF= Aveia-preta + Ervilhaca forrageira. AP + EF + N= Aveia-preta + Ervilhaca forrageira + Nabo forrageiro.

Fonte: Autores (2025).

Na tabela 2, seguem os dados encontrados a partir de análise em artigos e trabalhos científicos da massa seca produzida das principais culturas de outono e inverno utilizadas no estado, e consórcios entre culturas, encontrados por diferentes autores. A fim de visualizar quais culturas tem maior potencial de produzir palhada, e consequentemente, maior aporte de C ao solo.

Tabela 2: Dados de massa seca (Mg.ha-¹) para das principais culturas de outono/inverno utilizadas no RS.

Cultura	**Massa seca (Mg.ha-¹)**	**Fonte**
Avena strigosa Schreb	5,76	Ruedell apud Campos (2006)
Avena strigosa Schreb	3,29	Gonçalves (1999)
Avena strigosa Schreb	2,42	Doneda (2013)
Avena strigosa Schreb	8,41	Nemirscki (2019)
Avena strigosa Schreb	2,74	Koefender (2016)
Avena strigosa Schreb	6,49	Nemirscki (2018)
Avena strigosa Schreb	3,48	Nemirscki (2018)
Avena strigosa Schreb	5,30	Nemirscki (2018)
Avena strigosa Schreb	6,27	Carneiro (2008)
Avena strigosa Schreb	3,00	Ziech (2015)
Avena strigosa Schreb	4,70	Ziech (2015)
Média	4,71	
Desvio Padrão	1,91	
***Raphanus sativus* L.**	3,42	Bianchi apud Campos (2006)
***Raphanus sativus* L.**	8,71	Doneda (2013)
***Raphanus sativus* L.**	7,61	Nemirscki (2019)
***Raphanus sativus* L.**	2,74	Koefender (2016)
***Raphanus sativus* L.**	3,44	Nemirscki (2018)
***Raphanus sativus* L.**	6,68	Nemirscki (2018)
***Raphanus sativus* L.**	7,33	Nemirscki (2018)
***Raphanus sativus* L.**	5,29	Carneiro (2008)
***Raphanus sativus* L.**	2,20	Ziech (2015)
***Raphanus sativus* L.**	2,66	Ziech (2015)
Média	5,01	
Desvio Padrão	2,41	
Lupinus angustifolius	5,02	Gonçalves (1999)
Lupinus angustifolius	5,54	Nemirscki (2019) (conclusão)
Lupinus angustifolius	6,45	Nemirscki (2019)
Média	5,67	
Desvio Padrão	0,72	
Vicia sativa	1,59	Gonçalves (1999)
Vicia sativa	5,54	Doneda (2013)
Vicia sativa	5,89	Nemirscki (2019)
Vicia sativa	2,10	Koefender (2016)

ISBN 978-65-990392-6-3

Vicia sativa	6,26	Nemirscki (2018)
Vicia sativa	4,04	Nemirscki (2018)
Vicia sativa	5,36	Nemirscki (2018)
Média	4,40	
Desvio Padrão	1,88	
Lolium multiflorum Lam.	6,74	Nemirscki (2019)
Lolium multiflorum Lam.	5,49	Nemirscki (2018)
Lolium multiflorum Lam.	2,58	Nemirscki (2018)
Lolium multiflorum Lam.	3,90	Nemirscki (2018)
Média	4,68	
Desvio Padrão	1,82	
Secale cereale	3,56	Doneda (2013)
Secale cereale	4,07	Ziech (2015)
Secale cereale	4,56	Ziech (2015)
Média	4,06	
Desvio Padrão	0,50	
Triticum aestivum	3,35	Nicoloso (2019)
Triticum aestivum	5,00	Nicoloso (2019)
Triticum aestivum	3,95	Nicoloso (2019)
Triticum aestivum	5,79	Nemirscki (2018)
Triticum aestivum	3,81	Nemirscki (2018)
Triticum aestivum	5,13	Nemirscki (2018)
Média	4,51	
Desvio Padrão	0,94	
AP + N	8,12	Doneda (2013)
AP + N	7,90	Nemirscki (2018)
AP + N	6,94	Nemirscki (2018)
AP + N	7,47	Nemirscki (2018)
Média	7,61	
Desvio Padrão	0,52	
AP + EF	5,71	Ruedell apud Campos (2006
AP + EF	3,74	Doneda (2013)
AP + EF	8,09	Nemirscki (2019)
AP + EF	2,91	Koefender (2016)
AP + EF	4,00	Ziech (2015)
AP + EF	4,45	Ziech (2015)
Média	4,82	
Desvio Padrão	1,85	
AP + EF + N	2,60	Ziech (2015)
AP + EF + N	4,51	Ziech (2015)
Média	3,56	
Desvio Padrão	1,35	

Legenda: AP + EF= Aveia-preta + Ervilhaca forrageira. AP + EF + N= Aveia-preta + Ervilhaca forrageira + Nabo forrageiro.
Fonte: Autores (2025).

Pode-se observar que há uma maior variação de um autor para o outro em relação ao valor de massa seca produzida por determinada cultura, isso se deve principalmente pois cada experimento foi analisado sob condições diferentes de solo, clima e região. Sendo que, a produção de biomassa de uma cultura vai depender das condições em que ela está instalada. Nemirscki (2018), que avaliou a produção de massa seca de algumas culturas em três anos seguidos, e, sobre as mesmas condições de solo de um ano para o outro houve variações.

A mesma lógica pode ser vista nos dados de massa seca produzidas pelo trigo, encontrados por Nicoloso (2019), ele avaliou a produção da massa seca no trigo sendo posicionado em diferentes sistemas de manejo. Apenas em sucessão da soja, em sistema de rotação com soja (*Glycine max*), trigo (*Triticum aestivum)* e milho (*Zea mays*), e por último em sistema de rotação mais completa, no verão entre soja e milho, e no inverno entre trigo, aveia-preta (*Avena strigosa Schreb)* + ervilhaca (*Vicia sativa)* e nabo. Sendo que, em cada manejo houve variações na produção de massa seca do trigo, comprovando que o sistema de rotação ou sucessão utilizado influencia na produção de massa seca de uma determinada cultura.

Podemos observar também que Doneda (2013) encontrou valores altos de massa seca para o nabo forrageiro (***Raphanus sativus* L.)** (8,71 Mg.ha-¹), muito devido o nabo ter sido implantado após uma cultura leguminosa, que no caso era a soja. Devido o nabo ter uma capacidade maior em assimilar o N disponível no solo, deste modo, quando implantado após uma cultura leguminosa, ele consegue produzir maior quantidade de massa seca. Ao contrário do que encontrou Ziech (2015), em seu estudo, o nabo forrageiro (***Raphanus sativus* L.**) produziu bem menos massa seca (2,2 Mg.ha-¹), neste caso, o nabo foi implantado em um sistema onde tinha anteriormente milho, ou seja, teve menos disponibilidade de N por não ser uma cultura leguminosa antecessora, e, segundo o próprio autor, a cultura sofreu por condições adversas durante o desenvolvimento (época de semeadura e precipitação), o que explica a menor produção de massa seca.

Sabe-se então, que uma cultura dependendo o sistema em que ela é manejada possui potenciais diferentes em sequestrar C, Campos (2006) visualizou isso ao estudar a adição de C por culturas em diferentes formas de manejo, sejam em sistemas de sucessão com apenas duas culturas ou rotação com diversas. Por exemplo, a cultura do trigo quando posicionada em sucessão a soja, em média, ao longo de 19 anos adicionou anualmente 1,41 Mg.ha-¹ de C, porém, quando posicionado em um sistema onde havia uma rotação de culturas no inverno, intercalando o trigo com aveia-preta, o acúmulo anual de C ao solo pelo trigo foi de 2,04 Mg.ha-¹.

Mas, de modo geral, independentemente das variações que tenham devido as circunstâncias onde foram efetuadas as pesquisas, pode-se ver o potencial das culturas de inverno na produção de massa seca, e consequentemente, sua capacidade em acrescentar e sequestrar C ao solo.

O consórcio entre aveia-preta + nabo-forrageiro se demonstrou o melhor sistema pensando em aporte de C ao solo, principalmente pelo seu alto potencial de produzir massa seca 7,61 Mg.ha-¹, o que equivale a 3,04 Mg.ha-¹ de C.

Outra cultura que merece destaque e que ainda é pouco explorada a nível de estado é o tremoço-azul (*Lupinus angustifolius)*, é a cultura com maiores porcentagens de C presentes na massa seca (46,8%), e com bom potencial de produção de biomassa se bem manejado, o que garante altos aportes de C ao solo.

Os consórcios com a presença de ervilhaca-forrageira, ou a própria cultura sozinha, em comparação as outras culturas não demonstraram ter o mesmo potencial de disponibilizar C ao solo, muito provavelmente pela sua alta relação C/N, mas que traz outros benefícios pensando no sistema agrícola como um todo, principalmente fixação de N no solo.

Segundo os dados obtidos do IBGE, ficam sob pousio no inverno em média anualmente 5,11 milhões de hectares. Levando em consideração hoje as culturas que são utilizadas em maior escala no inverno, que são trigo e aveia-preta, ao usar estas culturas nessas áreas de pousio, quanto poderia ser adicionado de C ao solo em apenas um ano.

O trigo (*Triticum aestivum)* em média é capaz de produzir 4,51 Mg.ha-¹ de massa seca, com uma porcentagem de C de 46,6%, isso equivale a 2,10 Mg.ha-¹ de C que podem ser sequestrados e deixados sobre o solo, estendendo para as 5,11 milhões de hectares, seriam 10,73 milhões de Mg.ha-¹ de C sequestrados. O mesmo cálculo pode ser feito para a aveia-preta, sua produção média de massa seca é de 5,04, com uma porcentagem de 42,8% de C, isso equivale a 2,16 Mg.ha-¹ de C sequestrados e deixados sobre o solo, com seu uso nessas áreas de pousio, seriam 11,03 milhões de Mg.ha-¹ que seriam deixados de C sobre o solo. Por meio da palhada ficará acumulado e estocado no solo, mas para que se tenha um maior acúmulo, dependerá da quantidade de C adicionado ao sistema pelos resíduos de cultura, onde que, quanto mais C adicionado ao solo mais será acumulado, por isso, a escolha das culturas que irão compor o sistema de rotação é fundamental (Gonçalves 1999).

Sabe-se então, que nem todo o C sequestrado da atmosfera e adicionado ao solo por meio da biomassa das culturas será realmente estocado ao solo, parte dele se perde no processo de mineralização da palhada, então, se considera realmente sequestrado aquela parte em que com o passar do tempo fica estocado no solo.

Por exemplo, ao analisar os dados obtidos por Secretti (2017), ele avaliou diferentes sistemas de monocultura, sucessão e rotações de cultura no que se diz respeito ao potencial destes sistemas em estocar C ao solo. Ao comparar dois sistemas, um de monocultura de soja e pousio no inverno, com um sistema de sucessão onde se tinha soja no verão, e o uso de ervilhaca (*Vicia sativa)*, aveia, e aveia + ervilhaca no outono/inverno, ao decorrer de três anos, o sistema com uso de culturas no outono/inverno foi capaz de estocar +1,1 Mg.ha-¹ de C em comparação ao sistema de monocultura apenas de soja que teve um decréscimo nos níveis de C de -0,10 Mg.ha-¹.

Mas outra questão interessante que pode ser avaliada nos dados de Secretti (2017), é que no sistema de soja com uso de plantas de cobertura (aveia e ervilhaca) no inverno, no decorrer dos três anos, ao todo, foi aportado 12,96 Mg.ha-¹ de massa seca, levando em consideração que a porcentagem de C presente no tecido da aveia e da ervilhaca fica entorno de 42%, pode-se dizer que foi adicionado ao solo 5,44 Mg.ha-¹ de C, mas destes, 1,10 Mg.ha-¹ por hectare realmente com o decorrer do tempo foram estocados no solo e sequestrado, o equivale a um aproveitamento de 20,22%.

O mesmo pode ser observado no trabalho desenvolvido por Gonçalves (1999), semelhante a pesquisa feita por Secretti (2017), ele avaliou a influência de plantas de cobertura de inverno aos estoques de C do solo, em comparação a um sistema de pousio onde não foi aportado nada de biomassa no inverno. Foi avaliado o efeito ao decorrer de seis anos, a aveia-preta, no sexto ano (único ano em que foi avaliado a

biomassa) produziu 3,29 Mg.ha-¹ de massa seca, tendo a hipótese que ela tenha produzido valores semelhantes de massa seca nos anos anteriores, ao decorrer de seis anos ao todo foi produzido 19,74 Mg.ha-¹, levando em conta que a aveia-preta possui em média 42,8 % de C na massa seca, pode-se dizer que foi aportado ao solo durante os seis anos cerca de 8,44 Mg.ha-¹ de C, sendo que destes, 1,81 Mg.ha-¹ realmente foram estocados no solo no passar dos seis anos, ou seja, um aproveitamento de 21,44%.

No decorrer de seis anos, foi deixado no solo cerca de 30,12 Mg.ha-¹ de massa seca, com uma porcentagem média de 46,8% de C no tecido, isso equivale a 14,1 Mg.ha-¹ de C deixados no solo, sendo que, 3,38 Mg.ha-¹ foram realmente estocados no solo, o que representa 23,97% dos 14,1 Mg.ha-¹ que forma aportados ao solo pela palhada.

Deste modo, pode-se ver que o processo de estocagem de C no solo não é algo tão simples, e que que o C adicionado por meio da biomassa das culturas em um sistema agrícola, apenas parte dele será realmente sequestrado e estocado no solo. Mesmo assim, a intensificação sustentável agrícola com uso de plantas de cobertura ou culturas de grãos nas áreas de pousio demonstram um grande potencial de sequestrar C da atmosfera. Dos 11,03 milhões de Mg.ha-¹ que poderiam ser adicionas no solo com o uso da cultura do trigo nas áreas de pousio, conforme o cálculo realizado anteriormente, se 20% destes sejam estocados no solo no decorrer dos anos, seriam 2,21 milhões de Mg/h de C sequestrados. Se forem usados sistemas com maior potencial de sequestrar C esse número pode ser ainda maior, como por exemplo, se fosse usado nestas áreas de pousio o consórcio aveia + nabo, seriam 3,22 milhões de Mg.ha-¹ de C sequestrado.

4 CONCLUSÃO

No ano de 2021 ficou sob pousio na estação do inverno, no Estado do RS, 5,34 milhões de hectares. Nos últimos 10 anos, em média, ficaram anualmente 5,11 milhões de hectares sob as mesmas condições.

O tremoço-azul (*Lupinus angustifolius)* foi a cultura com maiores teores de C na biomassa seca, 46,8 g.Kg-¹, demonstrando ser uma cultura com potencial para sequestrar C ao solo. O consórcio entre aveia-preta + nabo-forrageiro se demonstrou o melhor sistema pensando em aporte de C ao solo, principalmente pelo seu alto potencial de produzir massa seca 7,61 Mg.ha-¹, o que equivale a 3,04 Mg.ha-¹ de C.

De todo o C adicionado ao solo pela biomassa seca das culturas de inverno, entre 20,22% e 23,97% deste C com o passar do tempo fica estocado no solo.

Em média, anualmente, ficam sob pousio no RS cerca de 5,34 milhões de hectares sob pousio no inverno, se nessas áreas fossem utilizados no inverno o consórcio aveia + nabo, poderiam ser sequestrados aproximadamente 3,22 milhões de Mg.ha-¹ de C.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBURQUERQUE, Márcio Amaral. **Estoques de carbono e nitrogênio e emissões de gases de efeito estufa em Latossolo Vermelho sob sistemas de culturas em**

plantio direto. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

AMADO, Telmo Jorge Carneiro; BAYER, Cimélio; ELTZ, Flávio Luiz Foletto; BRUM, Adroaldo Cassol. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 189-197, 2001.

ASSAD, Eduardo Delgado; LIMA, Marcos Aurélio; OLIVEIRA, Patrícia. Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. In: BALBINO, Luiz Carlos; CORDEIRO, Luiz Augusto Mendes; MARTINS, Cláudio Eduardo (org.). **ILPF**: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. Brasília: Embrapa, 2019. p. 153-167.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030)**: visão estratégica para um novo ciclo. Brasília: MAPA, 2021.

CALEGARI, Ademir. Perspectivas e estratégias para a sustentabilidade e o aumento da biodiversidade dos sistemas agrícolas com o uso de adubos verdes. In: LIMA FILHO, Osvaldo Fernando de; AMBROSANO, Edmilson José; ROSSI, Flávio; CARVALHO, Luiz Henrique (org.). **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil**: fundamentos e prática. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2014. v. 1, cap. 1, p. 507. ISBN 978-85-7035-313-9.

CAMPOS, Ben-Hur Costa de; AMADO, Telmo Jorge Carneiro; BAYER, Cimélio; ELTZ, Flávio Luiz Foletto. Carbon stock and its compartments in a subtropical oxisol under long-term tillage and crop rotation systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 805-817, 2011.

CAMPOS, Ben-Hur Costa de. **Dinâmica do carbono em Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo de solo e de culturas**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

CARNEIRO, Marco Aurélio Carbone; CURI, Nilton; RESCK, Dorgival Viana Silva; LIMA, João Marcos de. Produção de fitomassa de diferentes espécies de cobertura e suas alterações na atividade microbiana de solo de cerrado. **Bragantia**, v. 67, p. 455-462, 2008.

CARVALHO, João Luís Nunes; CERRI, Carlos Eduardo Pellegrino; CERRI, Carlos Clemente. SPD aumenta sequestro de carbono pelo solo. **Visão Agrícola**, v. 9, p. 132-135, 2009.

CONCEIÇÃO, Paulo Cesar; AMADO, Telmo Jorge Carneiro; BAYER, Cimélio; ELTZ, Flávio Luiz Foletto. **Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de**

manejo. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

COSTA, Falberni de Souza; BAYER, Cimélio; ALBUQUERQUE, Júlio Adriano; WARMLING, Margarete Terezinha. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 323-332, 2008.

DÁVILA, Giovanny Alexander Jurado. **Revisão das estimativas de estoques de carbono do solo em regiões do Rio Grande do Sul**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

DENARDIN, José Eloir; KOCHHANN, Rolf Anton; SATTLER, Alan; FAGANELLO, Adilson; BASSO, Carlos José. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2012. (Documentos, 15).

DONEDA, Alexandre; AITA, Celso; GIACOMINI, Sandro José; MIOLA, Eduardo Cecchin; GIACOMINI, Daniel Afonso. Fitomassa e decomposição de resíduos de plantas de cobertura puras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1714-1723, 2012.

DOS SANTOS, H. P.; FONTANELI, Renato Serena; SPERA, Sílvio Tulio; TOMM, Gilberto Oliveira. **Estoques de carbono no solo em tipos de manejo de solo e rotação de culturas para trigo**. 2017.

FERREIRA, Ademir de Oliveira. **Estoque de carbono em áreas pioneiras de plantio direto no Rio Grande do Sul**. 2014. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

FERREIRA, Ademir de Oliveira; AMADO, Telmo Jorge Carneiro; RICE, Charles W.; GONÇALVES, Daniel Ruiz Potma; RUIZ DIAZ, Dorivar A. Comparing on-farm and long-term research experiments on soil carbon recovery by conservation agriculture in Southern Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 11, p. 3365-3376, 2021.

GONÇALVES, C. N.; CERETTA, C. A. Plantas de cobertura de solo antecedendo o milho e seu efeito sobre o carbono orgânico do solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 307-313, 1999.

KOEFENDER, Jana; AMADO, Telmo Jorge Carneiro; REINERT, Dalvan José; SCHERER, José Renato; ROS, Carolina Oliveira da. Biomass and nutrient cycling by winter cover crops. **Revista Ceres**, v. 63, p. 816-821, 2016.

KRENCHINSKI, Fábio Henrique; PORTELA, Vítor de Oliveira; SANTI, Anderson; VARGAS, Lineu; STRECK, Evandro Anselmo. Agronomic performance of soybean grown in succession to winter cover crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 909-917, 2018.

LIMA, Larissa. Efeito das plantas de cobertura em Sistema de Plantio Direto. Enciclopédia Biosfera, v. 10, n. 18, 2014.

ISBN 978-65-990392-6-3

LIMA, Magda A.; BAYER, Cimélio; AMADO, Telmo Jorge Carneiro; LOVATO, Thomé; MARTINS, Ana Paula. **Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira**. 2012.

LOVATO, Thomé; MIELNICZUK, João; BAYER, Cimélio; VEZZANI, Fabiano Machado. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 175-187, 2004.

NEMIRSCKI, Jéssica Maiara. **Produção, decomposição de matéria seca e comportamento de nutrientes em culturas de cobertura no Sul do Brasil**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2019.

NICOLOSO, R. da S.; AMADO, Telmo Jorge Carneiro; BAYER, Cimélio; EITELWEIN, Maicon Tulio; MIOLA, Eduardo Cecchin. **A rotação de culturas aumenta os estoques de carbono e nitrogênio no solo sob sistema plantio direto**. Embrapa Suínos e Aves – Livro científico (ALICE), 2019.

PILLON, Clenio Nailto; BAYER, Cimélio; AMADO, Telmo Jorge Carneiro; CORAZZA, Elvio José. **Monitoramento do conteúdo de carbono orgânico em sistemas de manejo do solo na Serra do Sudeste, RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2007.

REDIN, Marciel. **Produção de biomassa, composição química e decomposição de resíduos culturais da parte aérea e raízes no solo**. 2014. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

SANTI, Anderson; DALMAGO, Genei Antonio; DENARDIN, José Eloir. **Potencial de sequestro de carbono pela agricultura brasileira e a mitigação do efeito estufa**. 2007.

SECRETTI, Mateus Luiz; AMADO, Telmo Jorge Carneiro; BAYER, Cimélio; SPAGNOLLO, Edson; ELTZ, Flávio Luiz Foletto. **Aporte de carbono ao solo por sistemas de monocultura, sucessão e rotação de culturas**. 2017.

VIERO, Fernando; CARNIEL, Eduardo; BAYER, Cimélio. **Carbono orgânico e suas frações afetadas por sistemas de manejo de longa duração**.

ZIECH, Ana Regina Dahlem; CARVALHO, Paulo César de Faccio; CASSOL, Luís Cláudio; NABINGER, Carlos; RIGOLOTTO, Liane. Proteção do solo por plantas de cobertura de ciclo hibernal na região Sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 374-382, 2015.

CAPÍTULO 18

POTENCIAL DA FOTOGRAMETRIA DE VANT PARA O MONITORAMENTO ESTRUTURAL DE FLORESTAS NATIVAS: ESTUDO DE CASO NA FLORESTA ESTACIONAL DECIDUAL EM FREDERICO WESTPHALEN-RS

Potential of VANT photogrammetry for structural monitoring of native forests: a case study in a deciduous seasonal forest in Frederico Westphalen, Brazil

Emanuel Araújo Silval[1]; Fábio Marcelo Breunig[2]; Messias Carneiro Soares[3], Marco Antonio Kramm[3], Gerson dos Santos Lisboa[4] , Lúcio de Paula Amaral[5], Gabriel Paes Marangon[6]; Anelisa Pedroso Finger[7]

[1] Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen, Departamento de Engenharia Florestal - Linha 7 de Setembro, s/n, BR 386 Km 40, Frederico Westphalen – RS, CEP: 98400-000; emanuel.araujo@ufsm.br

[2] Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná (DGEOG/SCT/UFPR), Curitiba 81531-970, PR, Brasil; fabiobreunig@ufpr.br

[3] Graduandos em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen, Departamento de Engenharia Florestal - Linha 7 de Setembro, s/n, BR 386 Km 40, Frederico Westphalen – RS, CEP: 98400-000; vinicius.zardo@acad.ufsm.br, messias.soares@acad.ufsm.br , marco.kramm@acad.ufsm.br

[4] Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Bairro Fazenda Santo Antônio, CEP: 74971-451 - Aparecida de Goiânia - Goiás – Brasil. Pós-Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Área: Manejo Florestal) da Unicentro, Setor de Ciências Agrárias e Ambientais, Campus Cedeteg, Guarapuava, PR; gersonlisboa@ufg.br

[5] Universidade Federal de Santa Maria, Prof. Dr., Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão – PPGAP, Colégio Politécnico da UFSM, Prédio 70, Bloco F, Sala 211-A, Santa Maria, RS. Brasil, CEP 97.105-900, Camobi, lucio.amaral@ufsm.br

[6] Universidade Federal do Pampa, Prof. Dr., Vice-coordenador do curso de Engenharia Florestal, Campus São Gabriel, Rua Aluízio Barros Macedo, s/n, BR 290 – Km 423, Sala 216, Prédio acadêmico, São Gabriel, RS. Brasil, CEP 97.307-020, Universitário, gabrielmarangon@unipampa.edu.br

[7] Engenheira Florestal, Doutora em Manejo Florestal, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos - CEP: 52171-900 - Recife/PE. Brasil, anefinger@yahoo.com.br

RESUMO

Este trabalho avaliou o uso de nuvens de pontos aerofotogramétricas obtidas por VANT para estimar variáveis estruturais de um fragmento florestal. 32 Parcelas circulares foram delimitadas com base na nuvem de pontos normalizada, permitindo a extração de métricas de altura e cobertura do dossel. Também foi construído um transecto, que evidenciou a estrutura vertical da floresta, variando de áreas abertas a regiões com dossel acima de 20 m. Modelos Random Forest foram ajustados para biomassa e densidade de árvores, alcançando desempenho de RMSE = 166,45 e R^2 = 0,54 para biomassa, e RMSE = 3,49 e R^2 = 0,30 para densidade de árvores. A análise de importância indicou, para biomassa, maior peso de Z_p50 (percentil 50 da altura), seguido de CanopyCover (cobertura do dossel) e Z_mean (altura média); para densidade, destacaram-se Z_p95 (percentil 95 da altura), Z_max (altura máxima) e Z_sd (desvio-padrão das alturas), refletindo a influência da heterogeneidade vertical. Os mapas gerados revelaram padrões espaciais consistentes da estrutura do dossel. Os resultados demonstram que a aerofotogrametria é uma alternativa viável ao LiDAR para caracterização estrutural florestal, embora melhorias metodológicas ainda sejam necessárias.

Palavras-chave: Fotogrametria; Drone; Estrutura do dossel.

ABSTRACT

This study evaluated the use of UAV-derived photogrammetric point clouds to estimate structural variables of a forest fragment. Thirty-two circular plots were delineated from the normalized point cloud, enabling the extraction of canopy height and cover metrics. A transect was also constructed, revealing the vertical forest structure ranging from open gaps to canopy regions exceeding 20 m. Random Forest models were fitted for biomass and tree density, achieving RMSE = 166.45 and R^2 = 0.54 for biomass, and RMSE = 3.49 and R^2 = 0.30 for density. Variable importance analysis indicated that, for biomass, the strongest predictors were Z_p50 (50th height percentile), followed by CanopyCover (canopy cover) and Z_mean (mean height); for density, the most influential variables were Z_p95 (95th height percentile), Z_max (maximum height), and Z_sd (standard deviation of heights), reflecting the role of vertical heterogeneity. The generated maps revealed consistent spatial patterns of canopy structure. Overall, the results demonstrate that UAV photogrammetry is a viable alternative to LiDAR for forest structural characterization, although methodological improvements are still required.

Keywords: Photogrammetry; VANT; Canopy structure.

1 INTRODUÇÃO

A Floresta Estacional Decidual é um dos ecossistemas característicos do norte do Rio Grande do Sul, ocorrendo em áreas de encostas e vales, frequentemente associada ao Alto Uruguai Gaúcho. Essa tipologia é marcada pela perda parcial da folhagem durante o inverno e pela elevada diversidade florística, incluindo espécies de valor ecológico e econômico como *Cedrela fissilis* (cedro), *Parapiptadenia rigida* (angico) e *Luehea divaricata* (açoita-cavalo). Contudo, essa formação vegetal também sofre intensos processos de fragmentação e supressão, estando fortemente ameaçada, assim como outros ecossistemas do bioma Mata Atlântica (RIBEIRO et al., 2009).

A Floresta Estacional Decidual no norte do Rio Grande do Sul encontra-se em estado avançado de fragmentação, devido à expansão agropecuária e à substituição por monocultivos florestais e agrícolas (RIBEIRO et al., 2009). Esses fragmentos remanescentes desempenham papel essencial para a conservação da biodiversidade regional e para a manutenção de serviços ecossistêmicos como o estoque de carbono, regulação hídrica e proteção do solo.

Nesse cenário, monitorar atributos estruturais florestais como biomassa aérea e densidade de árvores é essencial para a avaliação da resiliência do bioma, bem como para subsidiar iniciativas de restauração, manejo sustentável e políticas de conservação. Biomassa aérea está diretamente relacionada ao armazenamento de carbono e produtividade dos ecossistemas, enquanto a densidade de árvores reflete a regeneração e estabilidade da floresta (CHAVE et al., 2014; AVITABILE et al., 2016).

Embora os inventários florestais tradicionais ainda sejam o padrão na coleta desses dados, sua aplicação em larga escala é limitada por custos elevados, dificuldade logística e alta demanda de mão de obra. Nesse contexto, a fotogrametria via VANT surge como alternativa eficiente e econômica para a obtenção de dados estruturais tridimensionais da vegetação. A partir de imagens RGB processadas por técnicas de *Structure from Motion (SfM),* é possível gerar nuvens de pontos 3D capazes de descrever com detalhe a superfície da vegetação (DANDOIS; ELLIS, 2013; VERHOEVEN, 2011).

Além dos custos elevados e da necessidade de equipamentos especializados associados ao LiDAR, a fotogrametria via VANT (SfM/DAP) se destaca como uma alternativa eficiente e economicamente atraente para pesquisas florestais. Estudos demonstram que, mesmo em ambientes florestais plantados, os modelos estruturais derivados de fotogrametria são comparáveis aos do LiDAR em precisão (Adj-R^2 = 0,52–0,83 vs. 0,58–0,91; rRMSE similares) em atributos como altura do dossel (CAO et al., 2019). Em condições adversas (por exemplo, vento ou ausência de pontos de controle ideais), DSMs gerados por fotogrametria ainda exibem níveis de precisão vertical aceitáveis (RMSE ≈ 3,5–5,1 m) (GAŠPAROVIĆ et al., 2017). Além disso, em plantações jovens de *Quercus ilex*, nuvens de pontos derivadas de imagens RGB geraram estimativas de biomassa aérea e carbono com precisão e rapidez, a custos significativamente menores (JUAN-OVEJERO et al., 2023). Portanto, fotogrametria se apresenta como uma tecnologia acessível, robusta e aplicável para monitoramento e inventário florestal, especialmente quando recursos são limitados.

Por outro lado, o uso de dados fotogramétricos em florestas densas, como a Floresta Estacional Decidual, impõe desafios técnicos relevantes. A presença de copas sobrepostas, variações abruptas de altura e alta densidade da vegetação dificultam a modelagem precisa da estrutura florestal, em especial do sub-bosque e da topografia do solo, comprometendo estimativas de altura real e biomassa (GOODBODY et al., 2019; BATCHELOR et al., 2025). Essas limitações exigem desenvolvimento de metodologias adaptadas, capazes de extrair métricas estruturais confiáveis em ambientes nativos e heterogêneos.

Estudos recentes vêm demonstrando o potencial da fotogrametria aplicada a florestas nativas, inclusive para estimativas de densidade de árvores individuais e biomassa, por meio de modelos estatísticos e algoritmos de aprendizado de máquina, a partir de métricas derivadas de nuvens de pontos fotogramétricas (IGLHAUT et al., 2019). Contudo, os resultados ainda são variados conforme o tipo de floresta, densidade de cobertura e topografia local, destacando a importância de estudos regionais que testem a eficácia dessa abordagem em diferentes condições ecológicas.

Adicionalmente, o desenvolvimento de métodos de contagem automática de árvores a partir de imagens de VANT tem sido testado em contextos de vegetação real, com resultados promissores mesmo em ambientes nativos. Por exemplo, um estudo conduzido por ATAŞ e TALAY (2022) utilizou imagens aéreas de alta resolução para detectar e contar árvores em áreas designadas, utilizando técnicas de aprendizado de máquina. O trabalho reportou uma precisão média de 87% na contagem de árvores em regiões definidas, demonstrando que tais abordagens podem apoiar inventários florestais com boa confiabilidade.

Em outro estudo mais próximo ao contexto natural, SUN et al. (2023) aplicaram algoritmos de segmentação em nuvens de pontos fotogramétricas derivadas de VANT em florestas de coníferas chinesas, segmentando árvores individuais com F-score de até 0.94. Além disso, modelaram a biomassa individual com erros relativos (rRMSE) inferiores a 35%, demonstrando que a combinação de contagem precisa de árvores com modelagem estrutural possibilita estimativas confiáveis de biomassa, mesmo em florestas complexas.

Dessa forma, torna-se essencial investigar o uso de fotogrametria em florestas nativas sul-brasileiras, contribuindo para suprir lacunas científicas relacionadas à quantificação estrutural em ecossistemas complexos como a Floresta Estacional Decidual. O avanço dessas técnicas pode ampliar o acesso a ferramentas de

mapeamento de alta resolução, fortalecendo práticas de conservação, monitoramento e manejo adaptado à realidade ambiental da região.

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial da fotogrametria com VANT no mapeamento estrutural de um fragmento de Floresta Estacional Decidual no norte do Rio Grande do Sul, com ênfase na estimativa da densidade de árvores, da biomassa aérea e da estrutura do dossel a partir de modelos de aprendizado de máquina.

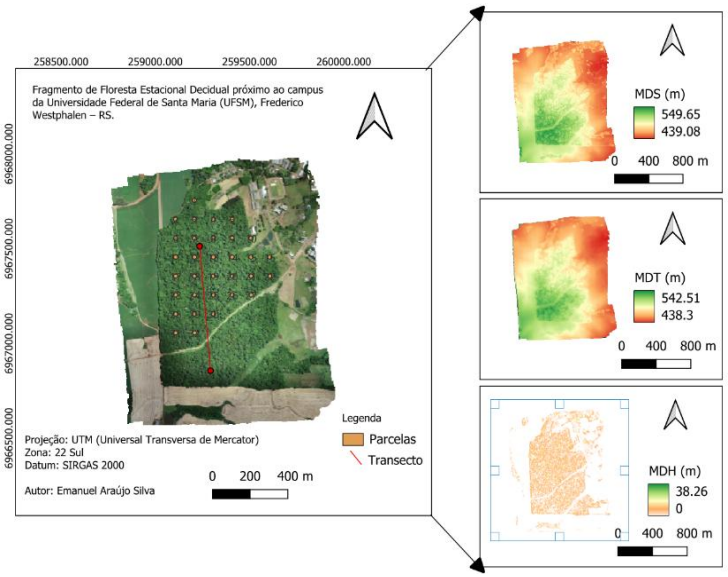
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em um fragmento de Floresta Estacional Decidual, localizado no município de Frederico Westphalen, região norte do Rio Grande do Sul, nas proximidades do campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). A região apresenta clima Cfa subtropical úmido, segundo a classificação de Köppen, com verões quentes, invernos frios e ocorrência de geadas frequentes. A precipitação média anual situa-se em torno de 1.800 a 2.000 mm, distribuída ao longo do ano (ALVARES et al., 2013). O relevo é ondulado, típico do Alto Uruguai Gaúcho, e a altitude média da área estudada é de aproximadamente 480 metros acima do nível do mar.

O fragmento florestal analisado possui 54,6 hectares, distribuídos de forma descontínua, devido à presença de uma linha de transmissão de energia elétrica que atravessa sua porção sul, dividindo-o em duas partes. Essa característica intensifica o efeito de borda e contribui para a fragmentação estrutural do ecossistema, fator que pode influenciar diretamente a regeneração, a composição florística e a conectividade do dossel. Apesar disso, o fragmento mantém uma fisionomia típica de vegetação secundária em regeneração, com estrutura heterogênea e diversidade de espécies arbóreas nativas. (Figura 1).

Figura 1 - Ortomosaico e produtos derivados para o Fragmento de Floresta Estacional Decidual próximo ao campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em Frederico Westphalen – RS.



Fonte: autor, 2025.

2.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS

O levantamento aéreo foi realizado no dia 31 de outubro de 2024, aproximadamente às 11 horas da manhã, de modo a reduzir os efeitos de sombreamento das copas e garantir melhor uniformidade de iluminação nas imagens. O voo foi conduzido a uma altura média de 250 metros em função das diferenças topográficas do terreno, sendo estabelecido um recobrimento lateral e longitudinal de 80%, o que assegurou a sobreposição adequada para o processamento fotogramétrico.

Para a coleta das imagens, utilizou-se um drone DJI Phantom 4 Pro, equipado com sensor CMOS de 1 polegada e 20 megapixels, lente com distância focal equivalente a 24 mm e abertura variável (f/2.8–f/11), além de obturador mecânico que minimiza distorções de movimento. Ao todo, foram adquiridas 272 imagens, posteriormente processadas no software Agisoft Metashape.

O processamento fotogramétrico foi realizado no software Agisoft Metashape (versão 2.1.2, licença trial de 30 dias) e consistiu inicialmente no alinhamento das imagens em modo “High” para gerar a nuvem de pontos esparsa. Em seguida, foi construída a nuvem de pontos densa, também em alta qualidade, a partir da qual se gerou o Modelo Digital de Elevação (MDE) e, por fim, o ortomosaico, com resolução final de 5,9 cm por pixel. Todos os produtos derivados do processamento foram exportados para análises subsequentes no software R Studio, com a integração da ferramenta Fusion para auxiliar na normalização da nuvem de pontos.

2.2 ANÁLISE DOS DADOS

As análises foram realizadas com o uso das bibliotecas lidR (ROUSSEL et al., 2020), sf (PEBESMA, 2018), terra (HIJMANS, 2023), dplyr (WICKHAM et al., 2023), ggplot2 (WICKHAM, 2016), viridis (GARNIER et al., 2021), patchwork (PEDERSEN, 2020), randomForest (LIAW; WIENER, 2002) e caTools (TUSZYNSKI, 2020). Após a importação dos arquivos .LAS e .shp, procedeu-se à normalização da nuvem de pontos e à extração de métricas estruturais em 32 parcelas circulares georreferenciadas com raio de 10m e área de 314,16m².

As métricas estruturais extraídas da nuvem de pontos seguiram metodologias consolidadas na literatura (POPESCU & WYNNE, 2004; DALPONTE et al., 2016; GLEASON & IM, 2012). Foram consideradas: altura máxima da copa (*Z*max), altura média (*Z*mean), área de copa por casco convexo (*convhull_area*), número de pontos por árvore (*npoints*) e biomassa estimada por equação empírica ajustada para o presente estudo.

A altura máxima da copa foi definida como:

$$Z_{max} = max(Z) \quad (1)$$

Onde: Z é altura dos pontos normalizados da nuvem (m); Z_{max} é maior altura registrada na copa (m).

A altura média foi obtida pela média aritmética simples das alturas:

$$Z_{médio} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Z_i \quad (2)$$

Onde: n é número de pontos atribuídos à árvore; Z_i é altura do ponto i da nuvem (m); $Z_{médio}$ é altura média da copa (m).

A área de copa foi calculada a partir do casco convexo formado pelos pontos da árvore:

$$A_{copa} = Área(CH(X,Y)) \quad (3)$$

Onde: *CH(X,Y)* corresponde ao polígono do casco convexo gerado pelas coordenadas planimétricas dos pontos da copa; A_{copa} é a área projetada da copa (m²).

$$n_{points} = \sum_{i=1}^{n} p_i \quad (4)$$

Onde: O número de pontos por árvore (*npoints*) corresponde ao total de pontos atribuídos a cada segmento individual após o processo de segmentação de copas e p_i representa os pontos pertencentes ao segmento da árvore i.

Por fim, a biomassa estimada foi calculada pela equação:

$$Biomassa = 2{,}5 \times A_{copa} + 3 \times Z_{médio} \quad (5)$$

Onde A_{copa} representa a área do casco convexo e $Z_{médio}$ a altura média da árvore. Esta equação foi adaptada com base em parâmetros de área de copa e altura como *proxies* para volume e biomassa (Asner et al., 2012).

Com base nas métricas extraídas, foram construídos modelos preditivos utilizando o algoritmo *Random Forest* (BREIMAN, 2001), aplicado tanto para a biomassa aérea quanto para a densidade de árvores por parcela. Os modelos foram calibrados com 70% dos dados e validados com os 30% restantes, por meio da divisão aleatória dos conjuntos de dados. A qualidade das estimativas foi avaliada por meio da raiz do erro quadrático médio:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i - \hat{y}_i} \quad (6)$$

Onde: y_i é valor observado para a parcela i; $\hat{y}_i$ é valor predito pelo modelo para a parcela i; n é o número total de parcelas; RMSE é o erro médio da predição em relação aos valores observados.

E do coeficiente de determinação:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} \left(y_i - \underline{y}_i\right)^2} \quad (7)$$

Onde: y_i é valor observado para a parcela i; $\hat{y}_i$ é valor predito pelo modelo para a parcela i; $\underline{y}_i$ é a média dos valores observados; n é o é o número total de parcelas; R^2 é a proporção da variância explicada pelo modelo.

Os modelos finais foram aplicados sobre toda a área de estudo, gerando superfícies contínuas de biomassa aérea predita (kg/ha) e densidade de árvores (n/ha). Esses resultados foram convertidos em mapas temáticos no formato GeoTIFF e armazenados em arquivos *raster*, que permitem integração com Sistemas de Informação Geográfica (SIG). A visualização e edição final dos mapas foi realizada em linguagem R com o pacote terra, enquanto gráficos de validação, com dispersão entre valores observados e preditos, foram gerados no ggplot2.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DAS PARCELAS

A caracterização estrutural das parcelas analisadas evidenciou forte heterogeneidade vertical no fragmento estudado, com número de árvores por parcela variando entre 11 e 28 indivíduos (média de 17,66), o que reflete a distribuição irregular típica de fragmentos em regeneração (Tabela 1). Estudos sobre fragmentação florestal confirmam que esse tipo de contexto induz modificações na estratificação vertical e heterogeneidade estrutural: em certos fragmentos, observa-se aumento da densidade do sub-bosque e redução da camada média, indicando reorganização do dossel (SILVA et al., 2020).

Dados provenientes de análises longitudinais mostram que fragmentação e bordas florestais reduzem significativamente a diversidade estrutural e o porte das árvores (HENDING et al., 2023). Esses achados apoiam os padrões observados neste estudo, especialmente a coexistência de indivíduos jovens e emergentes em um mosaico estratificado de dossel.

A variável H (m) Máx-Méd, correspondente à altura máxima média dos indivíduos em cada parcela, apresentou valor geral de 9,83 m, variando de 5,34 m a 17,81 m, com desvio-padrão de 2,74 m. Já o parâmetro H (m) Méd-Méd, que representa a altura média dos indivíduos por parcela, foi de 6,78 m, oscilando entre 3,28 m e 14,61 m (DP = 2,62 m). Esse padrão é consistente com o que a literatura descreve para florestas da Mata Atlântica sob fragmentação: a redução e o isolamento de remanescentes aumentam a heterogeneidade estrutural, modificam o dossel e tendem a reduzir atributos como diversidade e tamanho médio das árvores, sobretudo em áreas sujeitas a efeitos de borda. Em escala regional, a Mata Atlântica apresenta forte fragmentação e alta razão borda/interior, condição associada a mudanças estruturais persistentes nos fragmentos remanescentes, conforme mapeado por RIBEIRO et al. (2009)

Os parâmetros extremos (H (m) Máx-Máx = 25,31 m e H (m) Méd-Máx = 21,44 m) evidenciam a existência de indivíduos emergentes que se sobressaem na estrutura do fragmento. Em contrapartida, os valores mínimos (H (m) Máx-Min = 1,85 m; H (m) Méd-Min = 0,54 m) indicam a presença de árvores jovens ou regenerantes, compondo o mosaico estrutural característico da Floresta Estacional Decidual (CALLEGARO et al., 2022).

ISBN 978-65-990392-6-3

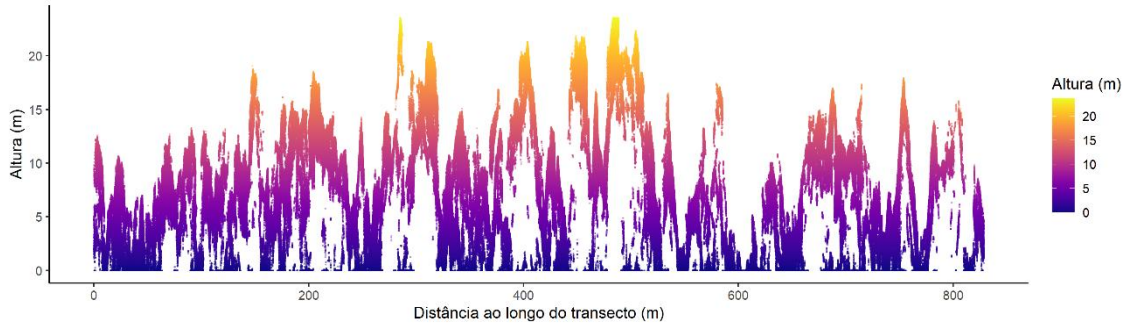
Tabela 1 – Estatísticas descritivas da estrutura das parcelas amostradas (n = 32), incluindo número de árvores por parcela (Nº de árvores), altura máxima (H Máx) e altura média (H Méd), expressas em valores médios, mínimos, máximos e desvio-padrão, derivadas da nuvem de pontos fotogramétrica obtida por VANT.

Parcelas	Nº de árvores	Altura max med	Altura max min	Altura max max	Altura max dp	Altura med med	Altura med min	Altura med max	Altura med dp
1	28	5,71	2,11	10,09	2,58	3,79	1,52	8,02	2,0
2	19	12,05	2,81	20,88	5,55	8,15	1,15	14,03	3,89
3	21	6,48	2,97	14,18	3,0	4,44	1,57	13,94	2,58
4	21	9,82	3,59	17,39	4,39	5,83	2,38	13,39	3,15
5	21	9,41	3,89	14,47	3,29	5,75	2,14	9,72	2,57
6	11	8,46	2,24	16,78	5,13	4,97	1,41	10,27	2,95
7	21	9,42	3,97	15,43	3,35	5,89	0,54	9,94	2,69
8	13	8,01	4,25	14,97	3,46	5,78	2,22	14,23	3,55
9	16	12,59	2,38	19,0	4,08	8,75	1,9	15,34	3,7
10	22	15,7	9,71	20,67	3,49	11,72	5,26	16,13	2,97
11	17	16,34	9,29	19,8	2,68	12,63	7,97	17,34	2,82
12	15	9,68	2,29	16,31	4,13	6,78	1,72	16,03	3,9
13	15	10,1	3,51	17,28	4,8	7,95	2,06	13,45	4,01
14	18	5,34	2,22	7,47	1,44	3,28	1,6	4,77	1,01
15	25	5,5	2,18	12,97	3,05	3,41	1,61	7,49	1,93
16	16	5,83	3,13	8,9	1,95	4,04	1,86	6,32	1,43
17	14	8,34	3,99	21,27	4,34	5,56	1,76	14,84	3,37
18	22	17,81	5,43	25,31	4,98	14,61	3,46	21,44	4,87
19	14	10,73	2,64	17,7	5,79	7,71	1,67	15,05	4,81
20	17	15,35	5,88	20,17	3,45	12,55	3,54	17,57	3,28
21	15	12,62	6,72	21,77	4,57	9,34	4,2	17,26	4,49
22	17	10,77	2,6	20,08	5,7	6,37	1,62	11,51	3,0
23	18	10,6	2,93	21,88	4,68	7,65	1,81	16,3	3,83
24	20	8,77	2,4	14,15	3,82	5,96	1,54	13,96	3,42
25	14	12,11	5,19	17,57	3,62	7,9	4,96	11,64	2,21
26	15	8,17	2,33	14,3	3,94	6,0	1,78	12,28	3,15
27	15	8,78	2,36	13,57	3,28	5,78	1,62	10,9	2,52
28	22	9,01	3,08	16,21	3,49	6,77	1,88	15,83	3,4
29	13	9,85	1,85	12,97	3,68	6,92	0,64	10,37	2,92
30	19	10,54	2,66	18,66	4,59	7,16	1,57	13,56	3,28
31	17	10,34	4,44	13,41	2,74	6,97	2,66	11,05	2,63
32	14	11,43	3,72	16,89	4,36	9,04	2,14	16,33	4,43

Onde: Nº de árvores = número total de indivíduos detectados por parcela; H (m) Máx-Méd = altura máxima média dos indivíduos em cada parcela; H (m) Máx-Min = menor valor de altura máxima por parcela; H (m) Máx-Máx = maior valor de altura máxima por parcela; H (m) Máx-DP = desvio-padrão das alturas máximas por parcela; H (m) Méd-Méd = altura média das copas em cada parcela; H (m) Méd-Min = menor valor de altura média por parcela; H (m) Méd-Máx = maior valor de altura média por parcela; H (m) Méd-DP = desvio-padrão das alturas médias por parcela.

A Figura 2 apresenta o perfil estrutural do fragmento florestal ao longo de um transecto delimitado entre os pontos P1 e P2, com aproximadamente 820 metros de extensão. O gráfico foi obtido a partir da nuvem de pontos aerofotogramétrica normalizada, gerada por processamento fotogramétrico (SfM). Cada ponto representa uma medida da altura relativa da superfície da vegetação em relação ao solo, possibilitando a análise da estrutura vertical do dossel.

Figura 2 - Perfil estrutural da vegetação ao longo do transecto P1–P2, obtido a partir da nuvem de pontos aerofotogramétrica normalizada.



Fonte: autor, 2025.

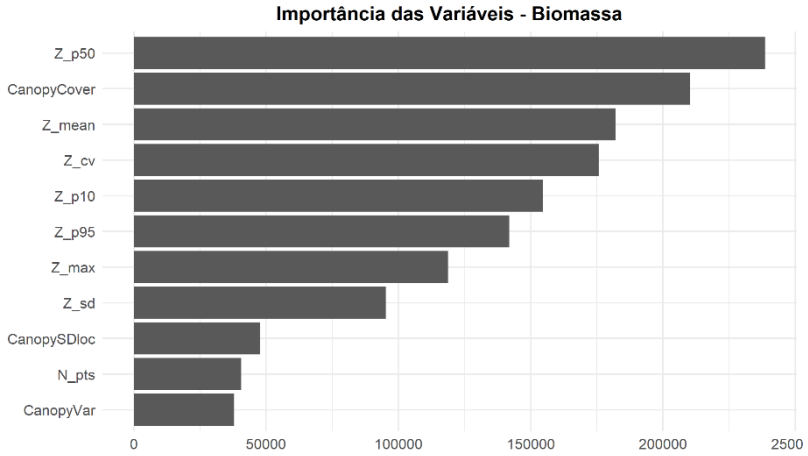
A altura variou de 0 até aproximadamente 22 metros, indicando a presença de árvores de porte médio e elevado distribuídas ao longo do transecto. Observa-se a formação de um dossel descontínuo, com áreas de maior cobertura intercaladas por clareiras e trechos de menor altura, padrão característico de florestas em regeneração e sujeitas à fragmentação. O perfil também revela uma estrutura em múltiplos estratos, com indivíduos do sub-bosque e árvores emergentes que se destacam acima da média do dossel.

Esse tipo de heterogeneidade estrutural é amplamente relatado em estudos sobre fragmentos florestais tropicais, nos quais a competição por luz e espaço resulta em forte variação horizontal e vertical (CHAZDON; FETCHER, 1984; HENDING et al., 2023). Dessa forma, os padrões encontrados neste estudo alinham-se à literatura que descreve a complexidade estrutural da vegetação nativa sob efeito de fragmentação e regeneração.

3.2 DESEMPENHO DOS MODELOS DE PREDIÇÃO

A análise de importância das variáveis revelou diferenças marcantes entre os modelos de biomassa e de densidade de árvores, refletindo os mecanismos ecológicos distintos que cada métrica procura representar. No caso da biomassa, os atributos mais relevantes foram as métricas de altura e de cobertura do dossel. Destacam-se o percentil 50 da altura, a cobertura do dossel (CanopyCover) e a altura média, seguidos por métricas de dispersão vertical, como o coeficiente de variação e os percentis inferiores e superiores da distribuição (Figura 3).

Figura 3 - Importância das variáveis utilizadas no modelo *Random Forest* para a predição de biomassa.



Fonte: autor, 2025.

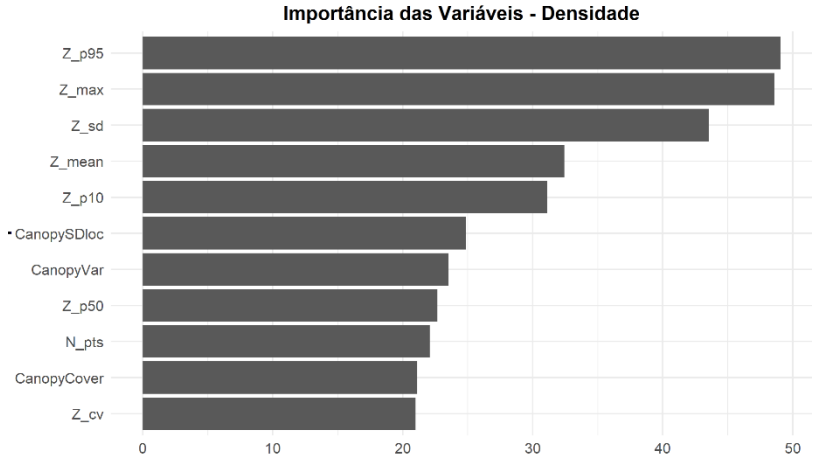
Esse padrão corrobora a literatura, uma vez que a biomassa está fortemente associada à altura e à área de copa das árvores, que sintetizam o volume da vegetação e o estoque de carbono. Estudos prévios em florestas tropicais e temperadas demonstram que métricas baseadas em percentis de altura (especialmente Zp50 e Zp95) são excelentes preditoras de biomassa, pois capturam tanto a estrutura média do dossel quanto a presença de indivíduos emergentes (ASNER et al., 2012). A importância da cobertura do dossel reforça o papel da densidade de copa na explicação da biomassa aérea. Estudos têm demonstrado que a estrutura do dossel, incluindo métricas de percentis de altura e cobertura, está entre os melhores preditores da biomassa acima do solo. ZOLKOS, GOETZ E DUBAYAH (2013), em uma meta-análise abrangendo diferentes biomas, apontaram que métricas de altura e de fechamento do dossel derivadas de LiDAR explicam grande parte da variabilidade da biomassa florestal.

De forma semelhante, DRAKE, DUBAYAH E CLARK (2002) observaram que a sensibilidade do LiDAR de grande pegada permite capturar a variação da estrutura vertical e associá-la diretamente à biomassa em florestas tropicais úmidas. DALPONTE et al. (2016) mostraram que a integração de métricas estruturais do dossel com informações espectrais pode aprimorar a predição da densidade de carbono em florestas, destacando o potencial das variáveis relacionadas à cobertura e heterogeneidade vertical do dossel.

Esses resultados corroboram os achados do presente estudo, mas evidenciam que, para o modelo de densidade de árvores, as variáveis mais influentes estão associadas à estrutura vertical do dossel. O percentil superior da altura (Z_p95) foi o preditor mais importante, seguido pela altura máxima (Z_max) e pelo desvio-padrão das alturas (Z_sd), todos refletindo a variação estrutural e a presença de árvores emergentes na floresta. A altura média (Z_mean) e o percentil inferior (Z_p10) também se destacaram, reforçando o papel da distribuição vertical da vegetação na explicação da densidade. Em contraste, variáveis relacionadas ao número de pontos (N_pts) e à cobertura do dossel (CanopyCover) tiveram menor importância relativa, sugerindo que a densidade de árvores é modulada principalmente pela heterogeneidade vertical e não apenas pela quantidade de retornos da nuvem de pontos (Figura 4).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 4 - Importância das variáveis utilizadas no modelo Random Forest para a predição da densidade de árvores.



Fonte: autor, 2025.

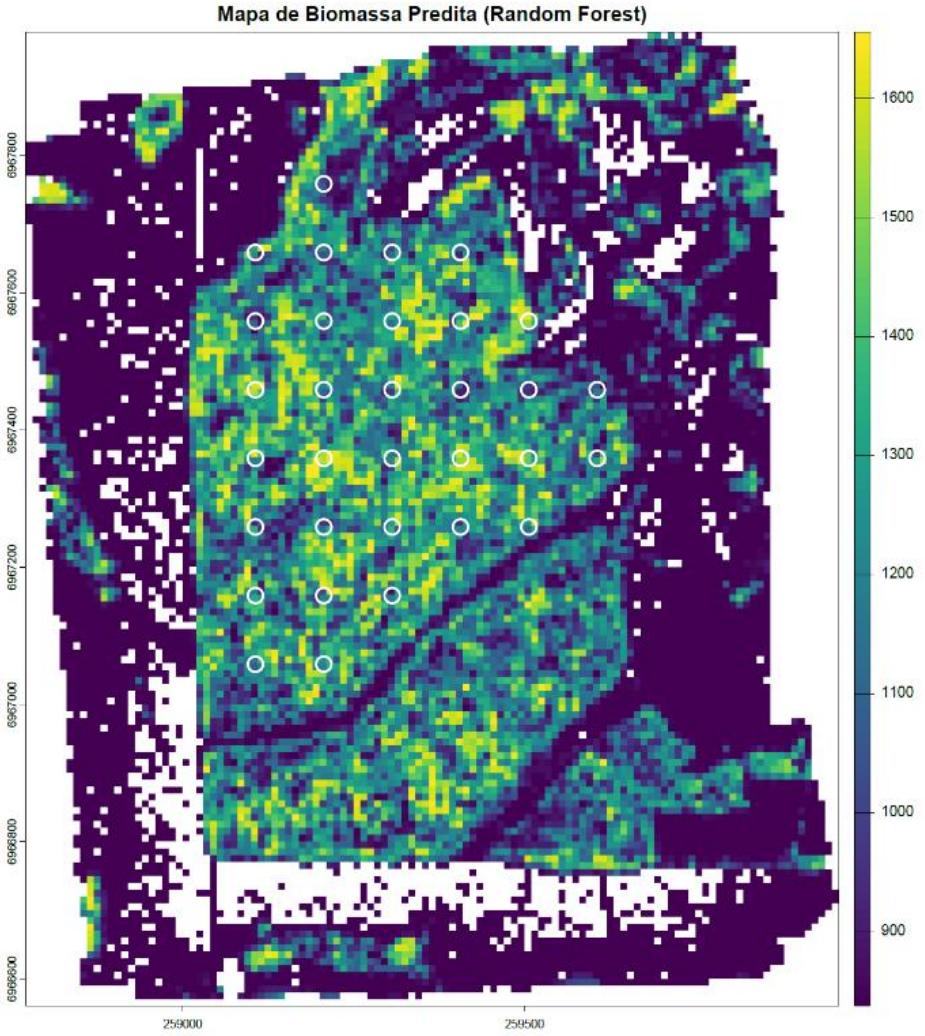
Essa associação já foi descrita em trabalhos que utilizaram fotogrametria aérea e nuvens de pontos para estimar densidade e abundância de árvores em florestas fragmentadas (PULITI et al., 2015). O destaque das métricas de altura sugere ainda que, embora a contagem de indivíduos dependa da densidade de retornos, ela é modulada pela estrutura vertical da floresta — áreas com maior altura máxima e emergentes tendem a ter menor densidade absoluta, ao passo que parcelas dominadas por indivíduos mais baixos e homogêneos exibem maior número de árvores. O destaque das métricas de altura sugere ainda que, embora a contagem de indivíduos dependa da densidade de retornos, ela é modulada pela estrutura vertical da floresta — áreas com maior altura máxima e emergentes tendem a ter menor densidade absoluta, ao passo que parcelas dominadas por indivíduos mais baixos e homogêneos exibem maior número de árvores.

Com base nesses preditores, o desempenho dos modelos apresentou diferenças claras. O modelo de biomassa atingiu um RMSE de 166,45 e um coeficiente de determinação (R^2) de 0,54, indicando que pouco mais da metade da variação observada na biomassa foi explicada pelos preditores mapeáveis. Esse desempenho pode ser considerado satisfatório, sobretudo quando comparado à literatura em florestas tropicais, onde valores de R^2 entre 0,5 e 0,65 e RMSE entre 24 e 60 Mg ha^{-1} são frequentemente reportados em estudos com LiDAR ou aprendizado de máquina (LI et al., 2023; XU et al., 2022). Já o modelo de densidade apresentou desempenho inferior, com RMSE de 3,49 e R^2 de apenas 0,30, o que reflete a maior dificuldade de capturar a variação da densidade de árvores a partir de métricas estruturais. Trabalhos semelhantes mostram que a predição de densidade tende a ser mais instável do que a de biomassa, justamente por depender não apenas da estrutura do dossel, mas também da regeneração e do sub-bosque, que muitas vezes não são bem representados em nuvens de pontos de origem fotogramétrica (PULITI et al., 2018).

A espacialização da biomassa e da densidade de árvores a partir do modelo *Random Forest* permitiu representar a distribuição estrutural da vegetação em todo o fragmento analisado. O mapa de biomassa evidencia um gradiente espacial heterogêneo, com valores variando aproximadamente de 900 a 1600 kg por célula de 10 m, destacando áreas com maior acúmulo de biomassa nas porções centrais do

fragmento, enquanto regiões periféricas apresentaram valores mais baixos. Essa configuração está de acordo com estudos que indicam que áreas de borda florestal tendem a apresentar menor biomassa devido a maiores distúrbios antrópicos e efeitos de borda, como aumento de luminosidade, vento e variações microclimáticas (LAURANCE et al., 2006; BROADBENT et al., 2008)(Figura 5).

Figura 5 - Mapa de biomassa predita a partir do modelo *Random Forest*.

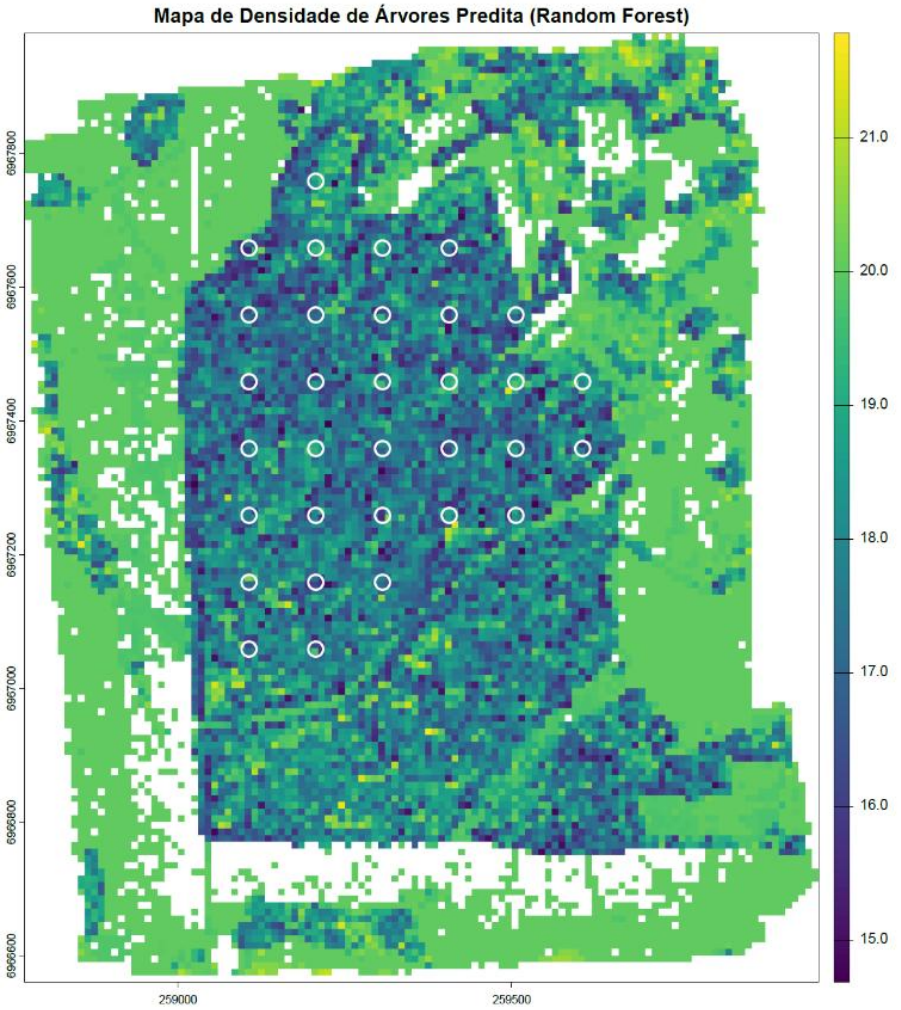


Fonte: autor, 2025.

O mapa de densidade de árvores, por sua vez, mostrou uma distribuição mais homogênea em comparação com a biomassa, com variações entre 15 e 21 árvores por célula de 10 m. Esse resultado indica que a densidade nem sempre está diretamente relacionada ao acúmulo de biomassa, já que áreas com alta densidade podem apresentar árvores menores e menos desenvolvidas, enquanto áreas com menor densidade podem concentrar indivíduos de maior porte que contribuem de forma mais expressiva para a biomassa total (CHAVE et al., 2014; RÉJOU-MÉCHAIN et al., 2019) (Figura 6).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 6 - Mapa de densidade de árvores predita pelo modelo *Random Forest*.



Fonte: autor, 2025.

A interpretação conjunta dos dois mapas revela padrões importantes da estrutura florestal. Por exemplo, locais com alta biomassa, mas densidade intermediária, provavelmente concentram árvores de maior diâmetro e altura, reforçando a ideia de que a biomassa é fortemente influenciada por poucos indivíduos dominantes. Em contraste, áreas com maior densidade e menor biomassa indicam trechos com regeneração ou predominância de árvores de pequeno porte. Esses padrões espaciais são fundamentais para o manejo florestal e conservação, permitindo identificar zonas prioritárias para manutenção da estrutura e estoque de carbono, bem como regiões em processo de regeneração que podem demandar diferentes estratégias de manejo.

Além disso, a possibilidade de gerar mapas a partir de variáveis derivadas de nuvens de pontos aerofotogramétricos demonstra o potencial do sensoriamento remoto de alta resolução para subsidiar estimativas espaciais contínuas, ampliando o alcance de informações que, tradicionalmente, dependiam de inventários de campo pontuais (LI et al., 2020).

De forma geral, os resultados confirmam que variáveis estruturais relacionadas à altura média e ao fechamento do dossel são as principais preditoras de biomassa,

enquanto a densidade de árvores está mais fortemente ligada ao número de pontos e à altura máxima registrada na nuvem. O desempenho moderado do modelo de biomassa demonstra seu potencial de aplicação para mapeamentos contínuos em fragmentos florestais, enquanto a menor precisão do modelo de densidade indica a necessidade de abordagens complementares, como o uso de métricas espectrais e texturais extraídas de imagens de alta resolução, ou algoritmos mais avançados de detecção de copas.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou a viabilidade do uso de nuvens de pontos aerofotogramétricas para caracterizar a estrutura da vegetação e gerar modelos preditivos de biomassa e densidade de árvores em fragmento florestal. A abordagem aplicada permitiu não apenas estimar essas variáveis a partir de métricas derivadas da altura do dossel, mas também espacializar seus padrões, fornecendo subsídios importantes para o monitoramento e manejo da floresta.

Embora os resultados tenham apresentado desempenho satisfatório para a biomassa e mais limitado para a densidade de árvores, o estudo reforça o potencial dessa tecnologia como alternativa de menor custo em comparação a sensores LiDAR. Recomenda-se, para trabalhos futuros, o aperfeiçoamento dos modelos preditivos por meio da integração com inventários de campo e da avaliação de outros algoritmos de aprendizado de máquina, o que pode contribuir para aumentar a precisão das estimativas.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507

ASNER, G. P. et al. A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping. **Oecologia**, v. 168, p. 1147–1160, 2012. DOI: https://doi.org/10.1007/s00442-011-2165-z

ASNER, G. P. et al. High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 38, p. 16738–16742, 2010. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1004875107

ATAŞ, M.; TALAY, A. Development of automatic tree counting software from VANT based aerial images with machine learning. **arXiv preprint**, 2022. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2201.02698

AVITABILE, V. et al. An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. **Global Change Biology**, v. 22, n. 4, p. 1406–1420, 2016. DOI: https://doi.org/10.1111/gcb.13139

BATCHELOR, J. L. et al. Drone-based, multispectral photogrammetric point clouds to classify fire severity at differing canopy height strata. **Fire Ecology**, v. 21, n. 39, 2025. DOI: https://doi.org/10.1186/s42408-025-00375-2

BORSAH, A. A.; NAZEER, M.; WONG, M. S. LiDAR-based forest biomass remote sensing: A review of metrics, methods, and assessment criteria. **Forests**, v. 14, n. 10, art. 2095, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/f14102095

BREIMAN, L. Random forests. **Machine Learning**, v. 45, p. 5–32, 2001. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

BROADBENT, E. N. et al. Forest fragmentation and edge effects from deforestation and selective logging in the Brazilian Amazon. **Biological Conservation**, v. 141, n. 7, p. 1745–1757, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.04.024

CALLEGARO, R. M. et al. Estrutura da vegetação e estoque de biomassa em Floresta Estacional Decidual no sul do Brasil. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 1, p. 93–111, 2022. DOI: https://doi.org/10.5902/1980509832294.

CAO, L. et al. Comparison of VANT-LIDAR and digital aerial photogrammetry (DAP) for estimating forest structural attributes in planted forests. **Forests**, v. 10, n. 2, art. 145, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/f10020145

CHAVE, J. et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, v. 20, n. 10, p. 3177–3190, 2014. DOI: https://doi.org/10.1111/gcb.12629

CHAZDON, R. L.; FETCHER, N**.** Photosynthetic light environments in a lowland tropical rain forest in Costa Rica. **Journal of Ecology**, v. 72, n. 2, p. 553–564, 1984. DOI: https://doi.org/10.2307/2260066.

DALPONTE, M. et al. Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 7, p. 1236–1245, 2016. DOI: https://doi.org/10.1111/2041-210X.12575

DALPONTE, M. et al. Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 7, p. 1236-1245, 2016. DOI: https://doi.org/10.1111/2041-210X.12575.

DANDOIS, J. P.; ELLIS, E. C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 259–276, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.005

DRAKE, J. B.; DUBAYAH, R. O.; CLARK, D. B. Sensitivity of large-footprint LiDAR to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 2-3, p. 378-392, 2002. DOI: https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00013-5.

DUNCANSON, L. et al. CMS: LiDAR Biomass Improved for High Biomass Forests, Sonoma County, CA, USA, 2013. **ORNL DAAC**, 2020. DOI: https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1764

GAŠPAROVIĆ, M.; SELETKOVIĆ, A.; BERTA, A.; BALENOVIĆ, I. The Evaluation of Photogrammetry-Based DSM from Low-Cost VANT by LiDAR-Based DSM. ***South-east European*** **Forestry**, v. 8, n. 2, p. 117–125, 2017. DOI: https://doi.org/10.15177/seefor.17-16

GLEASON, C. J.; IM, J. Forest biomass estimation from airborne LiDAR data using machine learning approaches. **Remote Sensing of Environment**, v. 125, p. 80–91, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.07.006
GOODBODY, T. R. H.; COOPS, N. C.; WHITE, J. C. Digital aerial photogrammetry for updating area-based forest inventories: A review. **Current Forestry Reports**, v. 5, p. 55–75, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s40725-019-00087-2

HENDING, D.; RANDRIANARISON, H.; ANDRIAMAVOSOLOARISOA, N. N. M. et al. Forest fragmentation and its associated edge-effects reduce tree species diversity, size, and structural diversity in Madagascar's transitional forests. **Biodiversity and Conservation**, v. 32, p. 3329–3353, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s10531-023-02657-0

HENDING, D.; RANDRIANARISON, H.; ANDRIAMAVOSOLOARISOA, N. N. M. et al. Forest fragmentation and its associated edge-effects reduce tree species diversity, size, and structural diversity in Madagascar's transitional forests. **Biodiversity and Conservation**, v. 32, p. 3329–3353, 2023. DOI: 10.1007/s10531-023-02657-0.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 276p.

IGLHAUT, J.; CABO, C.; PULITI, S. et al. Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review. **Current Forestry Reports**, v. 5, p. 155–168, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3

JUAN-OVEJERO, R. et al. Estimation of aboveground biomass and carbon stocks of Quercus ilex plantations using RGB-derived 3D point clouds: a fast and low-cost approach. **Annals of Forest Science**, v. 80, 2023. DOI: https://doi.org/10.1186/s13595-023-01210-x

LAURANCE, W. F. et al. Ecosystem decay of Amazonian forest fragments: a 22-year investigation. **Conservation Biology**, v. 16, n. 3, p. 605–618, 2002. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2002.01025.x

LIAW, A.; WIENER, M. Classification and regression by randomForest. **R News**, v. 2, n. 3, p. 18–22, 2002. Disponível em: https://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/

MITCHARD, E. T. A.; SAATCHI, S. S.; WHITE, L. J. T.; ABERNETHY, K. A.;

JEFFERY, K. J.; LEWIS, S. L.; COLLINS, M.; LEFSKY, M. A.; LEAL, M. E.; WOODHOUSE, I. H.; MEIR, P. Mapping tropical forest biomass with radar and spaceborne LiDAR in Lopé National Park, Gabon: overcoming problems of high biomass and persistent cloud. **Biogeosciences**, v. 9, p. 179–191, 2012. DOI: https://doi.org/10.5194/bg-9-179-2012

PEBESMA, E. **Simple features for R**: standardized support for spatial vector data. *The R Journal*, v. 10, n. 1, p. 439–446, 2018. DOI: https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H. Seeing the trees in the forest: Using lidar and multispectral data fusion for estimating tree height. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 70, n. 5, p. 589–604, 2004. DOI: https://doi.org/10.14358/PERS.70.5.589

PULITI, S.; ØRJASAETER, T.; GOBAKKEN, T.; NÆSSET, E. Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. **Remote Sensing**, v. 7, n. 8, p. 9632–9654, 2015. DOI: https://doi.org/10.3390/rs70809632

PULITI, S.; TALBOT, B.; ASTRUP, R. Tree-stump detection, segmentation, classification, and measurement using unmanned aerial vehicle (VANT) imagery. **Forests,** v. 9, n. 3, p. 102, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/f9030102

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: how much is left, and how is the remaining forest distributed? **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.02.021

ROUSSEL, J. R. et al. **lidR**: Airborne LiDAR data manipulation and visualization for forestry applications. R package, 2020. Disponível em: https://cran.r-project.org/package=lidR

SILVA, I.; ROCHA, R.; LÓPEZ-BAUCELLS, A.; FARNEDA, F. Z.; MEYER, C. F. J. Effects of forest fragmentation on the vertical stratification of Neotropical bats. **Diversity,** v. 12, n. 2, p. 67, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/d12020067

SUN, Z.; WANG, Y. F.; DING, Z. D. et al. Individual tree segmentation and biomass estimation based on VANT Digital aerial photograph. **Journal of Mountain Science**, v. 20, p. 724–737, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s11629-022-7563-7

VERHOEVEN, G. Taking computer vision aloft – archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with Photoscan. **Archaeological Prospection**, v. 18, n. 1, p. 67–73, 2011. DOI: https://doi.org/10.1002/arp.399

WICKHAM, H. et al. **dplyr**: A grammar of data manipulation. R package, 2023. Disponível em: https://cran.r-project.org/package=dplyr

WICKHAM, H. **ggplot2**: Elegant Graphics for Data Analysis. New York: Springer, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4

ISBN 978-65-990392-6-3

ZOLKOS, S. G.; GOETZ, S. J.; DUBAYAH, R. A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 128, p. 289-298, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.017

CAPÍTULO 19

AVALIAÇÃO GEOESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM LAVOURA COM POTENCIAL DE ALTA PRODUTIVIDADE DE SOJA

Geospatial evaluation of soil penetration resistance in crop with potential for high soybean yield

Amanda Fornari[1]; Antônio Luis Santi[1]; Luís Felipe Rossetto Gerlach[1]; Renan da Rosa[1]; Vitor Eduardo Schardong[1]; Gabriel Thiel Prevedello[1]; Amanda Trentin Moro[1]; Willian José Junges[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria – Campus Frederico Westphalen – Departamento de Ciências Agrárias, BR386 Km Linha 7 de Setembro, 98400000, Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul, Brasil
amanda.fornari@acad.ufsm.br, santi.pratica@yahoo.com, lfelipeross@hotmail.com, renandarosa1@gmail.com, schardong.vitor@acad.ufsm.br, prevedello.gabriel@acad.ufsm.br, amanda.moro@acad.ufsm.br, willian.junges@acad.ufsm.br.

RESUMO

Os solos compactados são prejudiciais na produção agrícola, dificultando o crescimento das raízes e a infiltração de água. A compactação do solo é normalmente causada pelo uso intensivo de maquinário agrícola associado ao manejo incorreto do solo. Uma das principais formas de avaliar a compactação do solo de maneira rápida é através da mensuração da resistência à penetração (RP). Neste sentido, objetivou-se avaliar a RP na camada de 0,15 a 0,20 metros em uma lavoura com potencial de alta produtividade de soja. O trabalho foi conduzido na safra de 2020/21, no município de Boa Vista das Missões-RS. A mensuração da RP do solo foi realizada em grid com densidade amostral de 0,5 ha. Os dados obtidos foram submetidos à análise geoestatística e confecção de mapas temáticos de variabilidade espacial. Os valores de RP mensurados apresentaram variação média, com CV% compreendido entre 10 e 20%. O modelo exponencial foi o que obteve o melhor ajuste, descrevendo a variabilidade empírica dos dados. A confecção de mapas temáticos mostrou-se eficiente ferramenta na identificação de locais com diferenças na RP do solo, podendo ser utilizada no manejo localizado da RP do solo. A área de alto potencial demonstrou em sua maioria valores de RP menores que 2.000 kPa.

Palavras-chave: Variabilidade. Compactação. Amostragem.

ABSTRACT

Compacted soils are detrimental to agricultural production, hindering root growth and water infiltration. Soil compaction is typically caused by the intensive use of agricultural machinery combined with incorrect soil management. One of the main ways to quickly assess soil compaction is by measuring penetration resistance (PR). In this context, the objective was to evaluate the PR in the 0.15 to 0.20-meter layer in a soybean field with high yield potential. The study was conducted during the 2020/21 growing season in the municipality of Boa Vista das Missões-RS. Soil PR was measured using a grid with a sampling density of 0.5 ha. The data obtained were submitted to geostatistical analysis and used to create thematic maps of spatial variability. The measured PR values showed average variation, with a CV% ranging between 10

and 20%. The exponential model was the best fit, describing the empirical variability of the data. The creation of thematic maps proved to be an efficient tool for identifying areas with differences in soil PR, and it can be used for localized management of soil PR. The high-potential area mostly showed PR values below 2,000 kPa.

Keywords: Variability. Compression. Sampling.

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução da colheita mecanizada e o crescente melhoramento de cultivares mais produtivas têm-se aumentado as áreas cultivadas (FACHIN et al., 2014). O uso de novas áreas agricultáveis para o plantio demanda igualmente maior número de máquinas e implementos modernos e de elevada capacidade operacional a serem empregados no campo para atender a sua necessidade tecnológica (CONAB, 2013). Associado a isso, o plantio direto também pode ser citado, pois proporciona o cultivo de extensas áreas em curto espaço de tempo.

O sistema de plantio direto (SPD) baseia-se nos princípios da cobertura permanente, revolvimento mínimo do solo, rotação de culturas e adubação verde. Sua adoção pode resultar em melhor eficiência para manter a qualidade física, química e biológica do solo e condições favoráveis ao desenvolvimento vegetal em decorrência da ausência de operações com máquinas para o preparo da área (LANZANOVA et al., 2010), proporcionando incremento em produtividade.

A produtividade de solos, além dos fatores citados anteriormente, é função, também, de alguns atributos que promovem o crescimento de raízes, infiltração e movimento de água no perfil do solo, trocas gasosas, atividade biológica e mineralização de carbono. Todos esses atributos são, em parte, relacionados as propriedades e processos físicos do solo (BURGER & KELTING, 1999), portanto, alterações nessas propriedades podem impactar seu rendimento produtivo, destacando aqui a compactação do solo

A compactação afeta a qualidade do solo e a sua avaliação é baseada na condição atual em que se encontra o solo em comparação a uma condição natural ou sem restrições ao crescimento e produtividade das culturas. A utilização de práticas inadequadas de manejo resulta diretamente em aumento na densidade do solo (Ds) e, por consequência, em alterações em outras propriedades físicas, tais como: a porosidade do solo, a retenção de água, a aeração e a resistência do solo à penetração das raízes (LETEY, 1985). Hill et al. (1985) mencionam que, mesmo com o aumento da Ds, os preparos com o mínimo revolvimento podem proporcionar maior quantidade de água disponível às plantas quando comparados ao preparo convencional, apesar de tais efeitos variam com a textura e com o teor de matéria orgânica dos solos.

Uma das principais causas do aumento da densidade dos solos é o tráfego de máquinas agrícolas, ocasionado pelo aumento o tamanho e da massa do maquinário em função da redução das janelas de semeadura e intensificação do sistema de produção, em operações de semeadura, tratos culturais e colheita. O problema do aumento da compactação agrava-se quando as operações agrícolas são realizadas em solos em condições de muita umidade e com pouca palha na superfície. O tráfego de máquinas pesadas pode promover a compactação superficial desses solos, sendo observados aumentos prejudiciais para as plantas, na faixa de 20 a 40 cm de

ISBN 978-65-990392-6-3

profundidade. A distribuição da compactação do solo em áreas sob plantio direto ocorre de maneira sistemática, sendo maior nas bordas e diminuindo para o centro da lavoura.

A resistência do solo à penetração (RP) é um dos fatores mais importantes no crescimento vertical das raízes no perfil do solo, alterando o potencial produtivo das culturas. Este problema vem sendo intensificado devido ao maior número de cultivos por ano, aumentando-se o tráfego de máquinas pesadas, o que pode aumentar a RP. Avaliações da RP podem ser realizadas utilizando equipamentos para mensurá-la, dos quais os penetrômetros são os mais usuais.

Os penetrômetros são os equipamentos mais adequados para prever a resistência à penetração das raízes (CAVALCANTE et al., 2011; MION et al., 2012). Por outro lado, a conveniência em mensurar a RP com o uso de penetrômetros, pode superestimar a resistência para o crescimento radicular. Sendo que o alongamento da raiz no solo pode ser limitado pela RP e estresse hídrico.

Atualmente, é possível de se mapear a variabilidade espacial da RP utilizando penetrômetros e técnicas de Agricultura de Precisão (AP) e digital. A AP surge como uma alternativa, para de forma racional, manejar a variabilidade espacial e temporal modificando os atributos químicos e físicos do solo com objetivo de maximizar eficientemente o uso das áreas agrícolas. Com isso, tornam-se de grande importância os estudos científicos que avaliam a relação máquina-solo-planta (LIMA et al., 2013).

O objetivo deste estudo foi analisar e caracterizar a variabilidade espacial utilizando a geoestatística com intuito de observar a resistência do solo à penetração em lavouras sob plantio direto, procurando identificar estados de compactação em diferentes camadas do solo em função do tráfego das máquinas relacionando ao sistema solo-planta.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

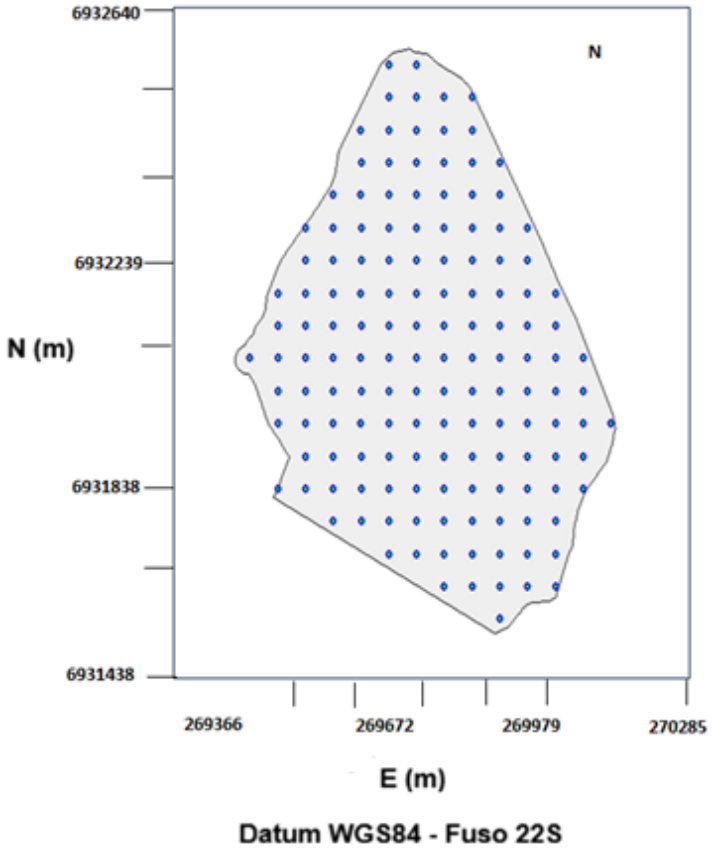
2.1 Área de estudo

O trabalho foi realizado no município de Boa vista das Missões na região norte do Rio Grande do Sul, Brasil, durante o ano agrícola de 2020/2021. A área localiza-se a uma latitude de 27º43'01,59" S e longitude de 53º20'04,82" O (Figura 1).

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico, pertencente a região fisiográfica Planalto Meridional do RS. Nesta classe de solo os solos são considerados profundos com mais de 2,50 m de espessura, bem drenados, porosos, de coloração vermelha escura e textura média (SANTOS et al.,2013). A demarcação da área experimental foi realizada com o auxílio de um GPS Garmin eTrex 10 (com precisão de 3 metros) percorrendo o perímetro do talhão, e posteriormente aferido à área o grid amostral (0,5 ha) através do software CR Campeiro. Foram alocados 147 pontos amostrais, espaçados regularmente em 50 por 50 metros. Na Figura 1 é apresentado o polígono delimitador da área e o grid de pontos amostrais utilizados na mensuração da RP do solo.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 1 – Contorno e grade amostral dos pontos de realização das avaliações de resistência à penetração do solo.



Fonte: Autores (2024)

2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados

As avaliações de RP foram realizadas utilizando um penetrômetro digital automático Falker, acoplado em um quadriciclo. Foram realizadas 4 leituras na profundidade de 0 até 0,60 m, obtendo valores de RP a cada 0,01 m de profundidade. O solo, no momento das leituras, encontrava-se com umidade em capacidade de campo.

Os valores obtidos na mensuração da RP compuseram o banco de dados utilizado nas análises subsequentes. Em um primeiro momento foi realizada a análise estatística descritiva dos dados, considerando os valores médios nas profundidades de 0,15; 0,16; 0,17; 0,18; 0,19 e 0,20 m. Em um segundo momento, procedeu-se a análise geoestatística e confecção de mapas temáticos de variabilidade espacial. A análise geoestatística foi realizada por meio do ajuste de semivariogramas experimentais, descritos por (Vieira 2000). Foram testados os modelos teóricos de semivariância: esférico, exponencial, gaussiano e linear. O ajuste dos modelos foi realizado com base no melhor coeficiente de determinação (r^2), bem como com análise de validação cruzada (valores observados versus valores estimados). Foi selecionado o modelo que melhor se ajustou á semivariância empírica dos dados. A análise geoestatística foi realizada utilizando-se o programa computacional Gamma Design Software – GS+ (Robertson 1998).

ISBN 978-65-990392-6-3

Do ajuste de um modelo matemático aos dados, foram definidos os seguintes parâmetros: efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C) e alcance (A). Depois de analisar e ajustar os semivariogramas foi realizada a interpolação por krigagem ordinária, levando-se em conta os parâmetros do semivariograma (modelo ajustado, efeito pepita, alcance e patamar) determinados pela análise geoestatística.

Além dos dados físicos obteve-se a média de produtividade das últimas quatro safras a partir do histórico do produtor baseado na colheita mecanizada e aferição em balança no momento da entrega do produto no local de armazenamento. Os dados foram convertidos em sacas por hectare.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 é apresentado o resultado da análise estatística descritiva dos dados de RP para as profundidades de 0,15; 0,16; 0,17; 0,18; 0,19 e 0,20 metros. Pode observar-se que houve grande discrepância entre os valores mínimos e máximos entre os atributos, o que comprova a existência de grande variabilidade na área. Conforme Pimentel Gomes e Garcia (2002) a variabilidade de um atributo pode ser avaliada pela ordem de grandeza do coeficiente de variação (CV%), tendo uma classificação: a) baixa (CV ≤ 10%), b) média (10% ≤ CV ≤ 20%), c) alta (20% ≤ CV ≤ 30%) e d) muito alta (CV > 30%). Com base nos resultados observados na Tabela 1, os valores de coeficiente de variação se encontram na faixa classificada como média variação.

Tabela 1 - Análise estatística descritiva dos valores de RP (kPa) correspondente aos valores Mínimo, Máximo, Médio, Desvio padrão, Coeficiente de variação (CV%) e Erro padrão (%), para as profundidades de 0,15; 0,16; 0,17; 0,18; 0,19 e 0,20 metros.

Parâmetros estatísticos	Profundidades analisadas (metros)					
	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20
Mínimo	1.203,33	1.317,00	1.280,67	1.262,67	1.154,67	1.147,00
Máximo	3.000,33	3.003,00	3.013,33	2.980,00	2.851,00	2.980,00
Média	1.948,58	1.980,08	1.998,35	1.997,51	1.971,96	1.947,70
Desvio padrão	355,78	350,03	341,86	330,33	326,36	329,15
CV%	18,26	17,68	17,11	16,54	16,55	16,90
Erro padrão	29,34	28,87	28,20	27,25	26,92	27,15

Fonte Autores (2024)

O maior valor médio de resistência do solo à penetração (RP) foi observado na profundidade de 0,17 m, atingindo 1.998,35 kPa. Esse valor encontra-se próximo ao limite considerado crítico para o crescimento radicular da soja, geralmente estabelecido em torno de 2.000 kPa. Estudos conduzidos por Marasca et al. (2011)

reportaram valores de RP variando entre 2.900 e 4.280 kPa em sistemas de plantio direto, os quais foram associados a restrições significativas ao desenvolvimento radicular. De forma semelhante, Macena et al. (2021) identificaram médias próximas de 2.504 kPa em solos sob cultivo de soja e milho, evidenciando que valores acima de 2.000 kPa tendem a representar condições de elevada compactação.

Por outro lado, Beutler e Centurion (2004) destacaram que mesmo valores inferiores, em torno de 850 kPa, já são capazes de reduzir a densidade radicular e comprometer a produtividade da cultura. Resultados adicionais corroboram essa tendência, apontando que valores de RP iguais ou superiores a 1.900 kPa constituem indicativos de solo compactado, com impactos negativos sobre a penetração radicular (Silva et al., 2012).

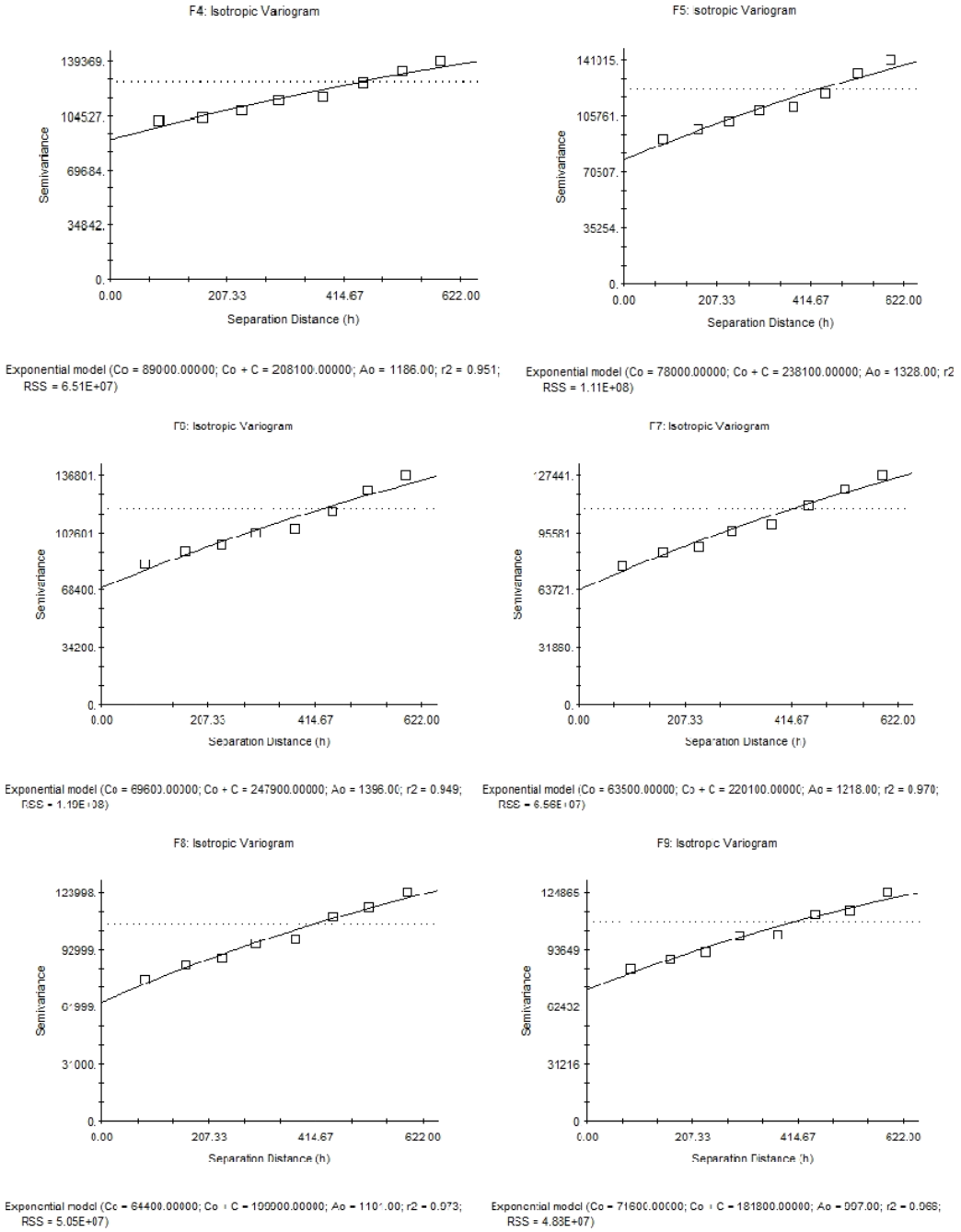
Na Figura 2 são apresentados os semivariogramas ajustados para a resistência do solo à penetração (RP), em diferentes profundidades de avaliação. Observa-se que o modelo exponencial foi o que melhor representou a estrutura espacial em todas as camadas, com coeficientes de determinação (r^2) elevados, superiores a 0,94, evidenciando um bom ajuste dos dados. O alcance (Ao) variou entre 907 e 1.396 m, indicando que a dependência espacial da RP se estende por grandes distâncias, o que revela continuidade na distribuição da compactação dentro da área. Já o efeito pepita (C0) apresentou valores expressivos, sugerindo que parte da variabilidade não foi explicada pelo modelo, possivelmente relacionada a fatores não mensurados ou a pequenas heterogeneidades do solo, enquanto a maior parcela da variância foi explicada pelo patamar (C0+C). Esses resultados reforçam que a RP apresenta dependência espacial estruturada, sendo possível realizar estimativas confiáveis por meio da krigagem ordinária.

Comparando com a literatura, Marasca et al. (2011) também verificaram que o modelo exponencial descreveu adequadamente a variabilidade da RP em áreas de plantio direto, destacando a transição gradual entre os pontos amostrados, semelhante ao que foi observado neste estudo.

Por outro lado, Beltrano et al. (2019) identificaram melhor ajuste do modelo esférico em condições edafoclimáticas distintas, ressaltando que a escolha do modelo depende tanto das características físicas do solo quanto do histórico de uso e manejo da área. Nesse sentido, os resultados obtidos corroboram parte da literatura ao confirmar que o modelo exponencial é frequentemente adequado para descrever a variabilidade da RP, mas também demonstram que essa escolha pode variar de acordo com o ambiente de estudo. Assim, a análise geoestatística aqui apresentada permite concluir que a compactação do solo possui forte estrutura espacial, sendo fundamental considerar esses padrões para o planejamento de práticas de manejo localizado.

Na Figura 3 são apresentados os gráficos de validação cruzada e os parâmetros de ajuste: coeficiente de regressão (quanto mais próximo ao valor 1, melhor o ajuste), erro padrão (SE), coeficiente de determinação (r2), intercepto (y) e erro padrão de predição. O menor erro padrão de predição observado foi de 292,867 kPa e o maior de 336,316 kPa, para as profundidades de 0,19 e 0,15 metros, respectivamente.

Figura 2 – Semivariogramas obtidos.

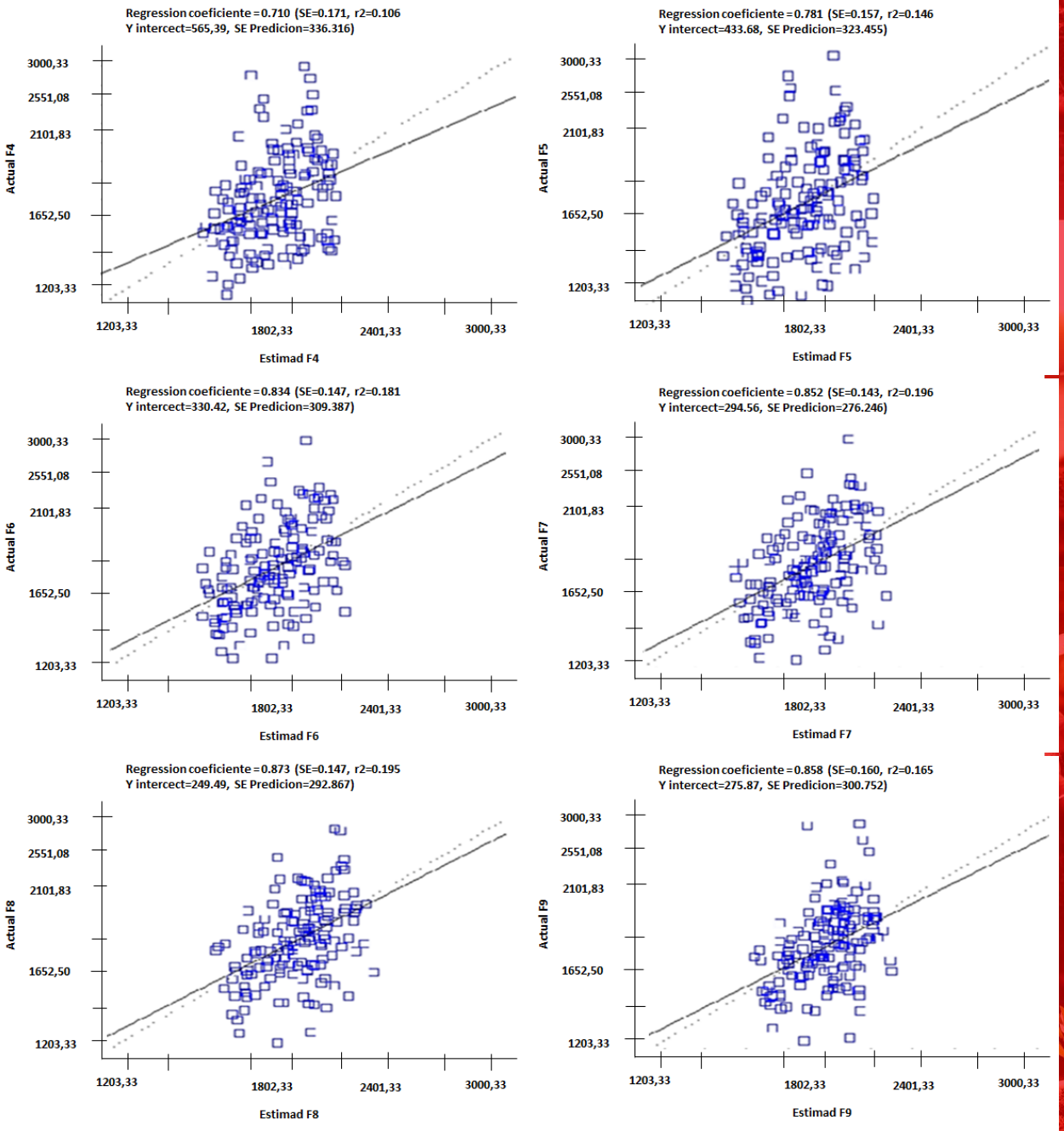


Legenda: Resistência a Penetração média na profundidade de 0,15 m (F4), 0,16 m (F5), 0,17 m (F6), 0,18 m (F7), 0,19 m (F8), e 0,20 m (F9).
Fonte: Autores (2024)

Observando os gráficos de validação cruzada, pode se perceber que o modelo foi eficiente para expressar os valores estimados de acordo com os valores reais, sendo que obteve um coeficiente de regressão acima de 0,710 (Figura 3) para todas as profundidades, sendo assim podendo realizar o método geoestatístico e mapas temáticos elaborados por krigagem na análise de dados. Na Figura 4 são apresentados os mapas temáticos de variabilidade espacial da RP do solo nas diferentes profundidades estudadas. Os mapas demonstram a variabilidade espacial

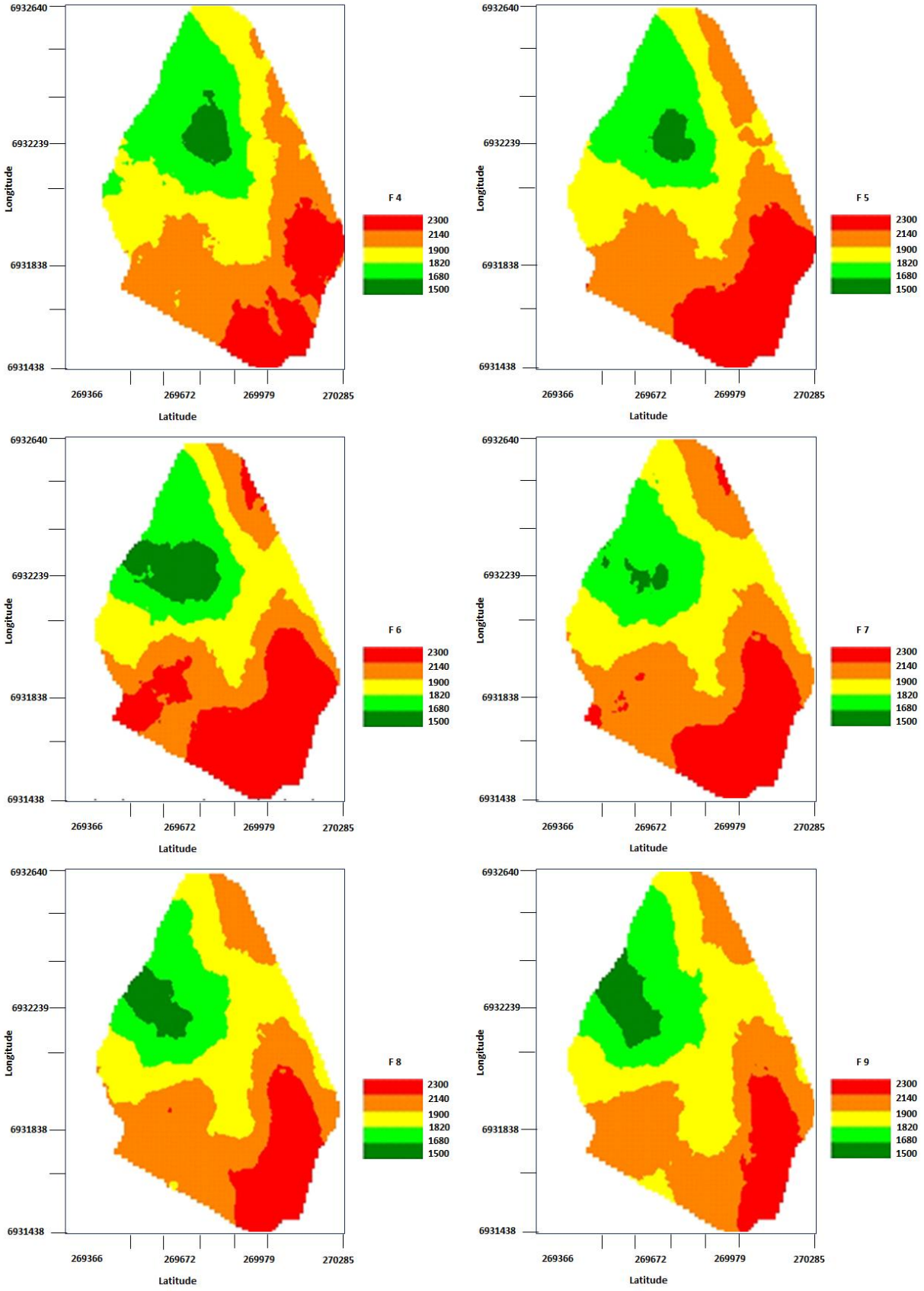
da resistência à penetração nas respectivas camadas de profundidade, podendo observar que o comportamento da variabilidade espacial se mantém constante, independente da profundidade estudada, ou seja, locais de maior ou menor RP são coincidentes.

Figura 3 – Validação cruzada para os semivariogramas ajustados.



Legenda: Camadas de 0,15 m (F4), 0,16 m (F5), 0,17 m (F6), 0,18 m (F7), 0,19 m (F8), e 0,20 m (F9).
Fonte: autores (2024)

Figura 4 – Mapas da variabilidade espacial de resistência a Penetração

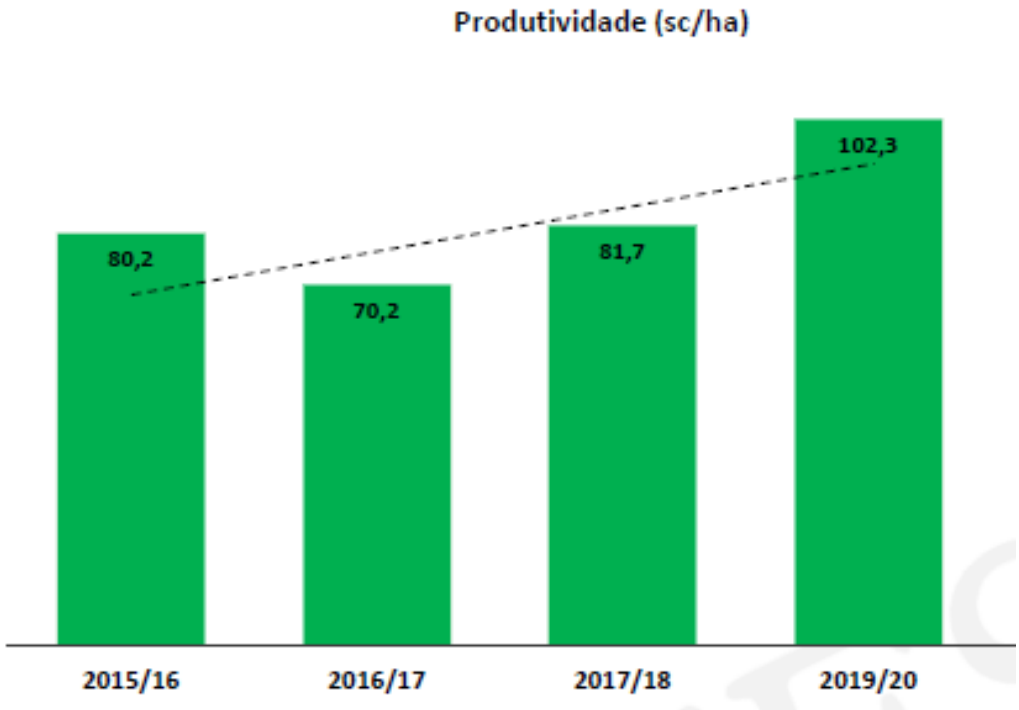


Legenda: Camadas de 0,15 m (F4), 0,16 m (F5), 0,17 m (F6), 0,18 m (F7), 0,19 m (F8), e 0,20 m (F9).
Fonte: autores (2024).

ISBN 978-65-990392-6-3

Para demonstrar o alto potencial produtivo da área, se obteve os dados médios de produtividade (Figura 5) obtendo média acima de 70 sacas ha^{-1} nas últimas 4 safras, atingindo 102 sacas ha^{-1} de média na última safra, mesmo com RP ultrapassando 2.000 kPa (2 Mpa), que conforme Tormena et al. (1998) já é crítico ao crescimento radicular e, consequentemente, gera diminuição na produtividade. Entretanto observa-se que a maior parte da área tem RP menor que 2.000 kPa, um forte indicativo para o bom desenvolvimento do sistema radicular da planta.

Figura 5 – Média histórica de produtividade de soja da área estudada.



Fonte: Autores (2024)

4 CONCLUSÃO

A resistência à penetração de solo na camada de 0,15m a 0,20m apresentou um comportamento variável médio mostrando que o estado de compactação nessa camada pode ter uma relação com o tráfego de máquinas.

O método geoestatístico e mapas temáticos elaborados por krigagem na análise de dados mostrou-se eficiente para a demonstração dessa variabilidade, devido ao coeficiente de determinação do ajuste do semivariógrama e a análise da validação cruzada.

REFERÊNCIAS

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l], v. 36, n. 6, p. 581-588, 2004.

BELTRANO, J.; RUIZ, H. A.; SILVEIRA, P. M. Modelagem geoestatística da resistência do solo à penetração em diferentes sistemas de manejo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 23, n. 4, p. 263-270, 2019.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, 2013. 353p
EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIAEMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

FREDDI, O.S. et al. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [.sl], v. 31, p. 627-636, 2007.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T. G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo Argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38 p. 1234-1244, 2014.

GUEDES, E. M. S.; FERNANDES, A. R.; LIMA, H. V.; SERRA, A. P.; COSTA, J. R.; GUEDES, R. S. Impacts of different management systems on the physical quality of in amazonian oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1269-1277, 2012.

MACENA, L. F.; SILVA, A. P.; SANTOS, H. G.; FONSECA, J. A. Resistência mecânica do solo em sistema soja-milho sob diferentes camadas compactadas. **Scientific Electronic Archives**, v. 14, n. 7, p. 45-54, 2021.

MARASCA, I.; REICHERT, J. M.; MENTGES, M. I.; FINK, J. R. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. ***Bioscience Journal***, v. 27, n. 3, p. 392-401, 2011.

PIMENTEL GOMES, F.; GARCIA, C.H. Estabilidade aplicada a experimentos agronômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: **FEALQ**, 2002. 309 p.

ROBERTSON, G. P. GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide.Plainwell: **Gamma Design Software**, 1998. 152p

SANTOS, H. G. et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Brasília: , 2013. 353 p.

SECCO, D. et al. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 58-64, jan./fev. 2009. S

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; BLANCANEAUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.2485-2492, 2000a.

ISBN 978-65-990392-6-3

SILVA, R. B.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Estimativa da resistência do solo à penetração a partir do índice S de qualidade física do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 36, p. 1703-1713, 2012.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n.2, p.229-35, 1991.

UTSET, A.; CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferrosol at several soil moisture conditions. **Soil & Tillage Research**, v.61, p.193-202, 2001.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds). Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2000. v.1, 352p. p. 1-54. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Sidney_Vieira/publication/313098532_Geoestatistica_em_estudos_de_variabilidade_espacial_do_solo_In_NOVAIS_R_F_et_al_Eds/links/5b87c6ef92851c1e123b80b2/Geoestatistica-em-estudos-de-variabilidade-espacial-do-solo-In-NOVAIS-R-F-et-al-Eds.pdf>.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.573-581, 1998.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 20

USO DE ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO NA DEFINIÇÃO DE PLANOS DE MANEJO INTELIGENTES EM ÁREA MANEJADA COM AGRICULTURA DE PRECISÃO

USE OF SOIL QUALITY INDEX IN DEFINING SMART MANAGEMENT PLANS IN AN AREA MANAGED WITH PRECISION AGRICULTURE

Willian José junges[1]; Antônio Luis Santi[1]; André Felipe de Conti[1]; Renan da Rosa[1]; Diego Armando Amaro da Silva[1]; Vitor Eduardo Schardong[1]; Amanda Fornari[1]; Thaís Camila Griebler[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria – Campus Frederico Westphalen – Departamento de Ciências Agrárias, BR386 Km Linha 7 de Setembro, 98400000, Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul, Brasil
willian.junges@acad.ufsm.br , santi.pratica@yahoo.com, decontiagro@gmail.com, renandarosa1@gmail.com, damaro.agro@gmail.com, schardong.vitor@acad.ufsm.br, amanda.fornari@acad.ufsm.br, griebler.thais@acad.ufsm.br .

RESUMO

O estudo avaliou a qualidade do solo em sistemas de manejo de inverno no sul do Brasil pelo índice de Qualidade do Solo (IQS). Foram analisados dez sistemas: pousio (PO), aveia-preta (Ap), aveia-branca (AB), azevém (AZ), nabo forrageiro (NF), ervilhaca (E), tremoço-branco (TB) e três consórcios (ApNFE, ApNF, ApE). As amostras foram coletadas em malha de 5 × 2,5 m, totalizando 100 pontos. O IQS, foi obtido conforme Andrews et al. (2002), em amostras de 0,00–0,10 m. Os indicadores foram agrupados em quatro funções: armazenar e suprir água (RASA); promover o crescimento radicular (CRAD); suprimento de nutrientes (SN); e, promover a conservação do solo e a atividade biológica (CSBIO), com pesos iguais de modo a compor o IQS. Resultados mostraram que indicadores isolados discriminam os sistemas, mas dificultam decisões. A análise integrada pelo IQS foi mais eficiente. Os maiores valores ocorreram em ApNFE, ApE e NF. Esses sistemas favoreceram CRAD e SN. O pousio apresentou bom SN, mas o menor IQS. Isso ocorreu devido a baixos valores de RASA e CSBIO. Conclui-se que indicadores químicos foram os mais sensíveis, seguidos pelos biológicos e físicos.

Palavras-chave: Indicadores de qualidade do solo. Sistemas de manejo de inverno. Plantas de cobertura do solo.

ABSTRACT

The study evaluated soil quality in winter management systems in southern Brazil using the Soil Quality Index (SQI). Ten systems were analyzed: fallow (PO), black oat (Ap), white oat (AB), ryegrass (AZ), forage radish (NF), vetch (E), white lupine (TB), and three consortia (ApNFE, ApNF, ApE). Soil samples were collected on a 5 × 2.5 m grid, totaling 100 points, and analyzed in the 0.00–0.10 m layer. The SQI was calculated according to Andrews et al. (2002), grouping indicators into four functions with equal weights: water storage and supply (RASA), root growth promotion (CRAD), nutrient supply (SN), and soil conservation and biological activity (CSBIO). Results showed that individual indicators discriminated the systems but hindered decision-

making, while the integrated analysis through SQI was more efficient. The highest SQI values were observed in ApNFE, ApE, and NF, which favored CRAD and SN. Although fallow presented good SN, it showed the lowest SQI due to low RASA and CSBIO values. It was concluded that chemical indicators were the most sensitive, followed by biological and physical ones.

Keywords: Soil quality indicators. Winter management systems. Cover crops.

1 INTRODUÇÃO

A adoção do Sistema de Plantio Direto (SPD) no sul do Brasil tem proporcionado a conservação do solo, ao mesmo tempo em que suporta o aumento da produtividade das culturas (DALLA NORA et al., 2014), como é o caso da agricultura de precisão, capazes de minimizar os efeitos resultantes da maior intensidade do uso das terras, visando altas produtividades (SANTI et al., 2015).

Para isso, se necessita um entendimento mais amplo em relação a multifuncionalidade dos sistemas envolvendo a cobertura do solo (SANTI et al., 2014), além da compreensão de que ferramentas inovadoras, por si só, não resolverão os problemas de manejo, necessitando a associação com outras técnicas de manejo visando uma menor variabilidade dos solos, que segundo Silva et al. (2008) é o principal componente relacionado à produção agropecuária. É nesse contexto, que um Plano de Manejo Inteligente (PMI) pode ser executado, planejando intervenções especializadas e localizadas, considerando as particularidades e gargalos existentes em cada talhão, priorizando estratégias multi-plantas e o uso racional da rotação de culturas.

No sul do Brasil, são comumente usadas coberturas de aveia preta ou nabo forrageiro, e embora seus benefícios sejam inegáveis, é necessário avaliar os efeitos sobre a qualidade do solo como um todo, sendo a integração das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, que o habilitam a exercer suas funções na plenitude (VEZZANI e MIELNICZUK, 2009). Todavia, escolher um sistema de manejo com base em benefícios isolados, pode ser um erro, visto a complexidade e a variabilidade destes sistemas (FREITAS et al., 2012), não dando certeza sobre a sustentabilidade resultante destas práticas. O desafio dos estudos sobre a sustentabilidade está relacionado ao desenvolvimento de métodos para avaliação da qualidade do solo e do ambiente agrícola sob interferência do homem (MELLONI et al., 2008).

No sul do Brasil, as práticas além da produção de grãos geralmente se restringem ao manejo no período de inverno, o que reforça a importância de avaliar sistemas que sejam efetivos na prática e que contribuam para a melhoria da qualidade dos solos agrícolas. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo de inverno, utilizando um modelo matemático baseado no Índice de Qualidade do Solo (IQS). Para isso, foram considerados atributos físicos, químicos e biológicos do solo, em área conduzida sob sistema de plantio direto (SPD) aliado a ferramentas de agricultura de precisão, no sul do Brasil.

ISBN 978-65-990392-6-3

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada em área experimental da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, campus de Frederico Westphalen, RS, localizada nas coordenadas 27°23'24.33" S e 53°25'39.58" O, com altitude de 483 m acima do nível médio dos mares. O clima do local é subtropical de primavera úmida (STPU) com temperatura média anual de 18,1ºC, e precipitação pluvial anual média de 1.919mm bem distribuídos ao longo do ano (MALUF, 2000). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (SANTOS, H. et al., 2013), com textura argilosa (66 %) e relevo suave ondulado.

O presente estudo avaliou dez sistemas de manejo de inverno, implantados pelo terceiro ano consecutivo na primeira quinzena de maio. Os tratamentos foram constituídos por: aveia-preta (*Avena strigosa*) – Ap; aveia-branca (*Avena sativa*) – AB; azevém (*Lolium multiflorum*) – AZ; nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) – NF; ervilhaca (*Vicia sativa*) – E; consórcio de aveia-preta + ervilhaca + nabo forrageiro (ApNFE); consórcio de aveia-preta +nabo forrageiro (ApNF); consórcio de aveia-preta + ervilhaca (ApE); tremoço-branco (*Lupinus albus*) – TB; e pousio invernal (vegetação espontânea – PO). O histórico de cultivos e as adubações realizadas na área experimental encontram-se descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Histórico dos cultivos, práticas de adubação e correção realizadas na área experimental

Período	Cultura	Adubação (NPK)	Quantidade (kg ha^{-1})	Forma de aplicação
Inverno	Plantas de cobertura	Calagem **	3500* **	Lanço/Incorporado **
Verão	Feijão	09-25-15 45-00-00	300 250	Linha Lanço
	Milho safrinha	09-25-15 45-00-00	350 250	Linha Lanço
Inverno	Plantas de cobertura	**	**	**
Verão	Feijão	09-25-15 45-00-00	300 250	Linha Lanço
Inverno	Plantas de cobertura	**	**	**

Legenda: (*) Calcário dolomítico PRNT 85%; (**) Sem Adubação (NPK).
Fonte: Diego Armando Amaro Da Silva (2024)

As amostras foram coletadas nos pontos de cruzamento de uma malha de 5 x 2,5 m, resultando em 100 pontos de amostragem para uma área total de 1.250 m^2, de modo que houvesse dez pontos amostrais por sistema de manejo de inverno avaliado (125 m^2 cada sistema). Em cada ponto foram coletadas amostras indeformadas e deformadas nas profundidades de 0,00 - 0,05 m e 0,05 - 0,10 m, para determinar indicadores químicos e físicos da qualidade do solo. A cada dois pontos amostrais por sistema, foi coletado um bloco de solo pelo método TSBF (*Tropical Soil Biology and Fertility*) (ANDERSON e INGRAM, 1993) de forma adaptada (0,25 x 0,25 x 0,10 m) (PIMENTEL et al., 2006; MENEZES et al., 2009; PINHEIRO et al., 2014), visando avaliar a macrofauna do solo (bioindicador da qualidade do solo), sendo segundo Schiavon et al. (2009) a camada representativa da biodiversidade do solo, visto a

concentração da matéria orgânica em superfície, sendo coletada ainda a serrapilheira que havia sobre os blocos de solo coletados.

Os indicadores físicos do solo determinados foram: densidade do solo (Ds), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total (Pt) do solo, por meio do método de anéis volumétricos (98 cm^3). A estabilidade de agregados em água foi determinada pelo método proposto por Kemper e Chepil (1965), sendo calculados o diâmetro médio geométrico (DMG) e a porcentagem de agregados estáveis em cada classe (8,00 - 4,76; 4,76 - 2,00; 2,00 – 1,00; 1,00 – 0,21; e menor que 0,21 mm), calculados segundo as proposições da metodologia de Tisdall et al. (1978).

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada através de um penetrômetro digital marca Falker modelo penetroLOG PLG1020®, haste de 0,40 m, cone com diâmetro de 0,00794 m e ângulo de cone de 30°, em quatro épocas entre os meses de setembro e novembro, com cinco repetições por ponto amostral em cada época, resultando em 20 leituras, sendo analisadas em conjunto de modo a obter maior consistência dos dados e precisão nos resultados. As análises foram efetuadas até 48 h após plena saturação do solo (em cada época), a fim de proceder às leituras próximas à capacidade de campo (PREVEDELLO, 1999; SANTOS, C. et al., 2013). Foi coletada uma amostra a cada 5 pontos amostrais a fim de determinar a umidade gravimétrica do solo, as quais ficaram entre 0,24 e 0,26 kg kg^{-1} nas quatro avaliações, não apresentando diferenças entre sistemas de manejo.

Os indicadores químicos do solo determinados foram: teores de matéria orgânica do solo (MOS), $pH_{água}$ (1:1), teores disponíveis de P e K ($Mehlich^{-1}$), Ca e Mg (KCl 1 mol L^{-1}), acidez trocável (Al) e acidez potencial (H+Al), e calculados a relação Ca/Mg, capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m), todas conforme metodologias descritas em Tedesco et al. (1995) e recomendadas pela Comissão... (2004).

Os blocos de solo (TSBF) foram triados manualmente em laboratório, sendo efetuadas: a pesagem da fauna do solo (BF, g m^{-2}), a contagem e a identificação dos organismos ao nível de ordem segundo Gallo et al. (1988), sendo a fauna estimada por m^{-2}, visando facilitar a interpretação dos dados. A partir disso, foram calculados os seguintes índices: índice de dominância de Simpson (Is), índice de diversidade de Shannon (H), e índice de uniformidade de Pielou (J), usando o software DivEs 3.0.

O índice de qualidade do solo (IQS) foi determinado segundo o método aditivo ponderado (ANDREWS et al., 2002a; MUKHERJEE e LAL, 2014), reunindo os indicadores de qualidade do solo em suas funções principais no solo, sendo atribuídos pesos e integrados conforme o modelo proposto. Para o cálculo do IQS foram definidas quatro funções principais do solo de pesos numéricos iguais (Tabela 2), com o somatório do peso das quatro funções igual a um, sendo o valor de máxima qualidade do solo e zero, o valor de um solo com limitações severas, e sem qualidade. Os indicadores de qualidade do solo foram selecionados com base em informações da literatura e IQS já propostos pela comunidade científica (MELO FILHO et al., 2007; MELO FILHO et al., 2009; FREITAS et al., 2012; NAKAJIMA et al., 2015).

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 2 – Funções principais e indicadores físicos, químicos e biológicos utilizados na avaliação da qualidade do solo em dez sistemas de manejo de inverno

Função principal	Ponderador da função	Indicador de qualidade*	Ponderador do indicador	Função principal	Ponderador da função	Indicador de qualidade	Ponderador do indicador
Receber, armazenar e suprir água (RASA)	0,25	Pt ($m^3\ m^{-3}$)	0,20	Promover o crescimento radicular (CRAD)	0,25	RP (MPa)	0,30
		Mac ($m^3\ m^{-3}$)	0,15			Ds ($m^3\ m^{-3}$)	0,20
		Ds ($m^3\ m^{-3}$)	0,15			Mac ($m^3\ m^{-3}$)	0,20
		RP (MPa)	0,10			m (%)	0,15
		DMG (mm)	0,10			MOS (g kg^{-1})	0,15
		MOS (g kg^{-1})	0,20	Promover a conservação do solo e a atividade biológica (CSBIO)	0,25	DMG (mm)	0,20
		Minhocas m^{-2}	0,10			Mac ($m^3\ m^{-3}$)	0,10
Suprimento de nutrientes (SN)	0,25	$pH_{água}$	0,20			Ds ($m^3\ m^{-3}$)	0,10
		MOS (g kg^{-1})	0,20			MOS (g kg-1)	0,20
		CTC_{pH7} ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,20			$pH_{água}$	0,10
		V (%)	0,10			CTC ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,10
		P (mg dm^{-3})	0,20			Minhocas m^{-2}	0,10
		m (%)	0,10			Índice de Pielou (J)	0,10

Legenda: Pt = porosidade total do solo; Mac = macro porosidade do solo; Ds = densidade do solo; RP = resistência do solo à penetração; DMG = diâmetro médio geométrico; MOS = matéria orgânica do solo; m = saturação por alumínio; CTC_{pH7} = capacidade de troca catiônica; V = saturação por bases.
Fonte: Diego Armando Amaro Da Silva (2024)

Posteriormente, os indicadores de qualidade do solo foram divididos em três grupos para obtenção de uma pontuação em escala padronizada (KARLEN e STOTT, 1994; ANDREWS et al., 2002b; MELO FILHO et al., 2007): (a) "mais é melhor", (b) "ótimo" e (c) "menos é melhor" (Figura 1). Nos indicadores classificados como "mais é melhor" (Pt, Mac, DMG, MOS, Minhocas, CTC_{pH7}, V, P e J), o menor conjunto de dados foi dividido pelos valores

observados, assim, o maior valor obteve peso um; para "menos é melhor" (Ds, RP e m), o menor valor do conjunto de dados foi dividido pelos valores observados, assim, o menor valor obteve peso um; para "ótimo"($pH_{água}$), os valores foram divididos em duas classes "mais é melhor" e "menos é melhor", sendo que os valores foram divididos segundo a classe.

Os dados dos indicadores de qualidade das principais funções do solo e dos IQS foram avaliados pela análise da variância, e as médias pelo teste de Scott-Knott ($p<0,05$), conforme Ferreira et al. (2012). Na análise dos dados foi utilizado o programa estatístico ASSISTAT 7.7.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os nutrientes P, K, Ca e Mg apresentaram teores classificados como altos ou muito altos (COMISSÃO..., 2004), não sendo constatada diferença significativa nos teores de MOS, corroborando com observado por Moreti et al. (2007) e Cunha et al. (2011), não encontrando alterações na MOS em solos cultivados com diferentes plantas de cobertura (Tabela 3). Notou-se um aumento nos teores disponíveis de P no

ISBN 978-65-990392-6-3

sistema NF, seguido pelos sistemas ApE e TB. Isto se deve provavelmente a ciclagem e a capacidade de absorção de P pelo NF, além da rapidez destes três sistemas no processo de liberação no solo, devido a menor relação C/N e C/P (CASALI et al., 2011) das crucíferas e leguminosas, acelerando a mineralização dos resíduos culturais, aumentando a biodisponibilidade de P no solo. Em contraposto, se observou menores valores de P no solo em sistemas monocultivados por gramíneas (Ap e AB), explicado pelos baixos teores de P na fitomassa (MARTINS, 2013) e a imobilização de P proporcionada pelos resíduos de menor relação C/N e C/P (GIACOMINI et al., 2003a; CASALI et al., 2011). Já para os teores disponíveis de K no solo foram maiores em sistemas com presença de Ap solteira ou consorciada, além de AB e E. Giacomini et al. (2003b) relataram o acúmulo de K por gramíneas, sendo destacado por Melo et al. (2011) como fornecedora de K ao solo devido a maior produção de matéria seca das gramíneas.

Tabela 3 – Valores dos indicadores químicos de qualidade do solo na camada 0,00 - 0,10 m em dez sistemas de manejo de inverno

Indicadores químicos da qualidade do solo

Sistema de Manejo	MOS		pH		P		K		Ca		Mg		Al		H+Al		CTC		V		m		Relação	
	g kg^{-1}		H_2O		---- mg dm^{-3} ----				---------- cmol$_c$ dm^{-3} ----------										---- % ----				Ca/Mg	
Ap	27,4	ns	6,24	c[1]	9,3	c	225	a	7,0	c	4,6	b	0,1	a	2,9	a	15,1	b	80	c	0,4	a	1,5	b
AB	27,7		6,09	c	11,5	c	240	a	6,6	c	4,3	b	0,1	a	2,9	a	14,5	b	80	c	0,3	a	1,5	b
AZ	27,9		6,64	b	13,2	b	194	b	8,2	b	4,8	b	0,0	b	2,2	b	15,7	b	86	b	0,1	b	1,7	a
NF	27,3		6,82	b	16,6	a	205	b	9,2	a	5,1	a	0,0	b	1,7	c	16,5	b	91	a	0,0	b	1,8	a
E	27,8		6,94	a	14,0	b	240	a	9,4	a	5,4	a	0,0	b	1,6	c	17,0	a	91	a	0,0	b	1,7	a
ApNFE	27,5		6,77	b	12,3	b	239	a	10,1	a	5,4	a	0,0	b	1,6	c	17,7	a	92	a	0,0	b	1,9	a
ApNF	27,5		7,01	a	12,6	b	208	a	9,9	a	5,7	a	0,0	b	1,4	c	17,7	a	92	a	0,0	b	1,7	a
ApE	28,4		7,10	a	16,5	a	273	a	10,4	a	5,5	a	0,0	b	1,4	c	18,0	a	92	a	0,0	b	1,9	a
TB	26,5		6,96	a	15,2	a	196	b	9,8	a	5,5	a	0,0	b	1,4	c	17,3	a	91	a	0,0	b	1,8	a
P	27,2		7,01	a	14,1	b	202	b	10,5	a	5,8	a	0,0	b	1,4	c	18,2	a	92	a	0,0	b	1,8	a

Legenda: MOS = matéria orgânica do solo; CTC_{pH7} = capacidade de troca catiônica; V = saturação por bases; m = saturação por alumínio. [1] Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott (p≤ 0,05), e ([ns]) não significativo (p≤ 0,05).
Fonte: Diego Armando Amaro Da Silva (2024)

Os teores de Ca e Mg no solo, além da relação entre os nutrientes e, consequentemente a CTC, V e os demais parâmetros de acidez do solo ($pH_{água}$, Al, H+Al e m), apresentaram comportamento semelhante, destacando os menores valores nos sistemas compostos de monocultivos de gramíneas (Ap, AB e AZ). Segundo Fabian (2009), alterando valores de $pH_{água}$ e diminuindo a acidez trocável e potencial, concordando com o encontrado neste trabalho. Devido aos valores encontrados nos indicadores $pH_{água}$, CTC e V, os valores de H+Al, Al e a saturação por este (m) apresentaram-se baixos ou inexistentes (Tabela 3), sendo desconsideráveis para serem interpretados.

Os indicadores físicos RP e Ds têm sido utilizados como indicativos da compactação do solo pela os menores valores observados (1,30 MPa), com o sistema de pousio invernal (PO) apresentando os maiores valores (1,95 MPa), muito próximos de 2 MPa, valor considerado crítico e limitativo ao crescimento radicular (JUNG et al., 2010).

Além disso, este sistema sem cobertura vegetal cultivada apresentou os maiores valores de Ds (et al. (2002), que constataram aumentos significativos na RP e Ds após cinco anos de pousio.

Tabela 4 – Valores dos indicadores físicos de qualidade do solo na camada 0,00 - 0,10 m em dez sistemas de manejo de inverno

Indicadores físicos da qualidade do solo												
Sistema de manejo	RP		Ds		Mac		Mic		Pt		DMG	
	MPa		kg dm^{-3}		---------- m^3 m^{-3} ----------						mm	
Ap	1,59	b	1,24	b	0,10	b	0,44	ns	0,55	ns	4,84	b
AB	1,60	b	1,20	b	0,13	a	0,43		0,56		4,72	c
AZ	1,30	c	1,24	b	0,09	b	0,44		0,54		4,74	b
NF	1,62	b	1,23	b	0,12	a	0,43		0,55		4,77	b
E	1,66	b	1,22	b	0,12	a	0,43		0,55		4,83	b
ApNFE	1,50	b	1,21	b	0,12	a	0,42		0,54		5,20	a
ApNF	1,56	b	1,25	b	0,10	b	0,44		0,53		4,83	b
ApE	1,59	b	1,26	b	0,10	b	0,44		0,53		4,85	b
TB	1,65	b	1,26	b	0,11	b	0,43		0,54		4,71	c
PO	1,95	a	1,31	a	0,10	b	0,44		0,54		4,68	c

Legenda: RP = resistência do solo à penetração; Ds = densidade do solo; Mac = macroporosidade; Mic = microporosidade; Pt = porosidade do solo; DMG = diâmetro médio geométrico. (1) Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott Knott (p≤ 0,05), e (ns) não significativo (p≤ 0,05).
Fonte: Diego Armando Amaro Da Silva (2024)

O sistema ApNFE apresentou maior DMG (5,20 mm) entre os tratamentos e, juntamente com NF, E e AB, apresentaram maior Mac, todas acima de 0,10 m^3 m^{-3}, considerada crítica ao crescimento das plantas (VOMOCIL e FLOKER, 1961). Assim como encontrado neste trabalho, Franchini et al. (2009) afirmam ser possível melhorar a estrutura do solo sem intervenção mecânica, beneficiando o desenvolvimento radicular e a disponibilidade para as culturas. As variáveis Mic e Pt não apresentaram diferenças significativas (Tabela 4)

Os dados relacionados aos indicadores biológicos são apresentados na Tabela 5. Os índices de diversidade (Is, H e J) apresentaram comportamentos semelhantes entre eles, com os melhores valores nos sistemas ApE, ApNFE, AZ e Ap, explicados pela maior riqueza de ordens taxonômicas e menor dominância nestes ambientes, além da ocorrência da ordem *Oligochaeta* (minhocas), considerado um dos grupos de maior importância da fauna edáfica, visto que compreendem entre 40 - 90 % da biomassa da macrofauna do solo (ANDRÉA, 2010), chegando neste trabalho, a picos de mais de uma tonelada por hectare na camada superficial do solo.

Estes organismos compreendem processos críticos para a manutenção da fertilidade e qualidade dos solos, agindo na decomposição da MOS e resíduos vegetais, na dinâmica de mineralização de nutrientes, e formando estruturas biogênicas (coprólitos) constituídas de agregados altamente estáveis, garantindo boa porosidade conferindo ao solo maior resiliência e, assim, resistindo mais a degradação (LAVELLE et al., 2001; BROWN e DOMÍNGUEZ, 2010), sendo considerados ótimos bioindicadores de qualidade do solo.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 5 – Valores dos indicadores biológicos de qualidade do solo na camada 0,00 - 0,10 m em dez sistemas de manejo de inverno

Indicadores biológicos de qualidade do solo												
Sistema de manejo	Minhocas		Abundância		Riqueza		Índices					
	------ Indivíduos m^{-2} ------				Nº de ordens		Is		H		J	
Ap	96	a	492	b	6,6	a	0,26	c	1,51	a	0,80	a
AB	22	c	378	b	3,6	c	0,60	b	0,74	c	0,56	b
AZ	58	b	339	b	5,6	a	0,28	c	1,36	a	0,81	a
NF	54	b	547	b	4,8	b	0,45	b	1,04	b	0,65	b
E	22	c	461	b	3,6	c	0,55	b	0,80	c	0,59	b
ApNFE	83	a	432	b	4,6	b	0,30	c	1,27	a	0,84	a
ApNF	54	b	506	b	5,4	a	0,43	b	1,12	b	0,66	b
ApE	74	b	349	b	4,4	b	0,29	c	1,28	a	0,87	a
TB	58	b	442	b	4,2	b	0,42	b	1,09	b	0,75	a
PO	22	c	2528	a	2,8	c	0,95	a	0,11	d	0,13	c

Legenda: Is = índice de dominância de Simpson; H = índice de diversidade de Shannon; J = índice de uniformidade de Pielou. (1) Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott ($p \leq 0,05$), e (^{ns}) não significativo ($p \leq 0,05$).

Fonte: Diego Armando Amaro Da Silva (2024)

Os resultados do índice de qualidade do solo (IQS) mostram que os sistemas consorciados ApNFE, ApE, além de NF (Tabela 6), apresentaram-se como sistemas de maior qualidade do solo, com ApNFE possuindo os maiores valores nas quatro funções principais do solo, destacando que este sistema apresentou os melhores DMG observados (5,20 mm), maior macroporosidade do solo (0,12 m^3 m^{-3}), abundância de minhocas elevada (83 indivíduos m^{-2}),
$pH_{água}$ próximo ao ideal (6,77), além dos maiores teores de bases trocáveis (K, Ca e Mg) e, consequentemente, maiores teores de CTC e V.

Tabela 6 – Valores das funções principais e dos índices de qualidade do solo (IQS) em dez sistemas de manejo de inverno. Frederico Westphalen, RS.

Sistema de manejo	Contribuição das funções								Índice de qualidade do solo (IQS)	
	RASA		CRAD		SN		CSBIO			
Ap	0,187	b	0,179	c	0,172	c	0,192	a	0,730	c
AB	0,184	b	0,190	b	0,176	c	0,178	c	0,728	c
AZ	0,183	b	0,199	a	0,190	b	0,187	b	0,759	b
NF	0,185	b	0,195	a	0,197	a	0,187	b	0,764	a
E	0,180	c	0,194	a	0,196	a	0,183	b	0,753	b
ApNFE	0,191	a	0,198	a	0,194	a	0,201	a	0,784	a
ApNF	0,179	c	0,190	b	0,196	a	0,186	b	0,751	b
ApE	0,183	b	0,193	a	0,202	a	0,195	a	0,773	a
TB	0,178	c	0,187	b	0,199	a	0,187	b	0,751	b
P	0,169	d	0,176	c	0,197	a	0,165	d	0,707	d

Legenda: RASA = receber, armazenar e suprir água; SN = suprimento de nutrientes; CRAD = promover crescimento radicular; CSBIO = promover a conservação do solo e atividade biológica.

Fonte: Diego Armando Amaro Da Silva (2024)

ISBN 978-65-990392-6-3

O sistema ApE, apresentou os maiores valores nas funções CRAD e CSBIO, com destaque aos valores observados em SN, proporcionando maior fertilidade do solo, porém com o mesmo não ocorrendo na função RASA, em função de menores valores de Mac e DMG, evidenciando menor porosidade e qualidade estrutural do solo em relação ao ApNFE. Já o sistema NF, se destacou por apresentar maior valor na função crescimento radicular (CRAD), principalmente em função da maior Mac proporcionada por este, sendo considerado pela literatura como um excelente condicionador do solo, devido ao sistema radicular pivotante agressivo, capaz de crescer em camadas compactadas do solo (MAGALHÃES et al., 2009; SILVEIRA JUNIOR et al., 2012). Ainda, o sistema NF apresentou valores elevados na função SN, devido principalmente ao fornecimento de P no solo, além de maiores teores de Ca, Mg e V. Entretanto, este sistema apresentou menores valores que ApNFE nas funções de fornecimento de água (RASA) e de promover maior conservação do solo e atividade biológica, muito em função de possuir menor DMG, CTC, abundância de minhocas m^{-2} e menor índice de uniformidade (J).

Desta forma, como observado neste trabalho, obtém-se um sistema capaz de proporcionar melhores condições de armazenamento de água, crescimento radicular, fornecimento de nutrientes, além de maior conservação do solo e atividade biológica, não havendo dúvidas da importância da consorciação de plantas, aliando elevada produção de matéria seca e a alta densidade radicular das gramíneas (MAGALHÃES et al., 2009), além do fornecimento de N ao solo pelas leguminosas (LOVATO et al., 2004).

O sistema de pousio invernal (PO) obteve o pior IQS calculado, devido aos piores resultados em três das quatro funções principais no solo, principalmente os relacionados aos indicadores físicos e biológicos, com os piores resultados nos indicativos de compactação do solo (RP e Ds), também encontrado por, menor estruturação do solo (DMG), porosidade (Mac), além de menor abundância de minhocas, menor diversidade de organismos (Riqueza, H e J), e maior dominância de um grupo sobre os demais (Is), evidenciando a degradação física e biológica proporcionada por este sistema, demonstrando que, embora os parâmetros químicos estejam excelentes (SN), possa não haver extração de nutrientes de forma satisfatória pelas plantas (CAMARGO e PIZA, 2007; MELO et al., 2011), em função do menor crescimento radicular e menor fornecimento de água neste sistema (Tabela 6).

Sistemas que utilizam gramíneas solteiras, em especial Ap e AB, apresentaram os piores resultados de IQS, principalmente devido a degradação dos indicadores químicos de qualidade do solo (SN), obtendo menores valores nos teores de P, Ca e Mg, além de menor CTC e V, devido as gramíneas funcionarem como imobilizadoras de nutrientes no solo (ARGENTA e SILVA, 1999), devido ao menor teor de N e P no tecido destas. Os sistemas AZ, E, ApNF e TB, obtiveram índices considerados intermediários, não promovendo maior qualidade e nem comprometendo o sistema solo (Tabela 6).

A análise de componentes principais (ACP) dos atributos químicos, físicos e biológicos dos sistemas de manejo de inverno (Tabela 7) em seis componentes conseguiu explicar mais de 80% da variância. O primeiro, responsável por 33,17% da variância total, agrupou pH em água, Ca, Mg, CTC, saturação por bases (V) e relação Ca/Mg, correlacionando-se negativamente com Al e H+Al. Restrito aos atributos químicos, esse componente destacou-se na diferenciação dos sistemas, principalmente Ap, AB e AZ, em relação aos demais, como também observado na

Tabela 3. No segundo componente, que explicou mais 17,21% da variância total entre os sistemas, destacam-se as relações positivas para os atributos biológicos abundância de organismos e o índice de dominância de Simpson (Is), sendo sensíveis o suficiente para diferenciar o sistema PO dos demais sistemas de manejo de inverno (Tabela 5 e 7).

Os indicadores biológicos H e J apresentaram relação negativa destacável (Tabela 7), sendo suficiente para segregar os sistemas Ap, AZ, além dos consórcios ApNFE e ApE dos demais sistemas testados (Tabela 5). Os organismos da fauna do solo possuem grande importância nas funções do solo, devido a estes serem capazes de modificar as características físicas, químicas e biológicas do solo, constituindo-se em componentes importantes para a avaliação da organização e funcionamento do mesmo (STEFFEN et al., 2007; SILVA et al., 2013).

A ACP dos atributos químicos, físicos e biológicos dos sistemas de manejo de inverno (Tabela 7) em seis componentes explicou mais de 80% da variância. O primeiro, responsável por 33,17%, agrupou pH em água, Ca, Mg, CTC, saturação por bases (V) e relação Ca/Mg, correlacionando-se negativamente com Al e H+Al. Restrito aos atributos químicos, esse componente destacou-se na diferenciação dos sistemas, principalmente Ap, AB e AZ, em relação aos demais, como também observado na Tabela 3.

Tabela 7 – Análise de componentes principais dos indicadores de qualidade química, física e biológica do solo em dez sistemas de manejo de inverno. Frederico Westphalen, RS.

Componente da variância	Componente principal					
	1	2	3	4	5	6
Autovalores	9,29	4,82	3,51	2,78	1,34	1,20
% da variância explicada	33,17	17,21	12,52	9,93	4,78	4,29
% da variância explicada acumulada	33,17	50,38	62,90	72,83	77,61	81,91
Indicador de qualidade/função do solo	---------- Matriz de correlação ----------					
$pH_{água}$	***0,855****	0,076	0,169	0,058	0,135	-0,052
Matéria orgânica do solo (MOS)	-0,219	0,181	0,483	-0,241	-0,142	0,569
Fósforo (P)	-0,165	0,409	***0,752***	-0,180	-0,079	0,268
Potássio (K)	-0,451	0,162	0,484	-0,206	0,020	0,183
Cálcio (Ca)	***0,923***	0,147	0,212	0,029	0,029	-0,068
Magnésio (Mg)	***0,864***	0,131	0,116	0,097	-0,032	-0,048
Al (acidez trocável)	***-0,865***	-0,036	-0,136	-0,029	-0,154	-0,041
H+Al (acidez potencial)	***-0,904***	-0,161	-0,177	-0,100	-0,107	0,184
Capacidade de troca catiônica (CTC)	***0,822***	0,309	0,356	-0,009	0,013	-0,078
Saturação por bases (V)	***0,926***	0,176	0,202	0,083	0,094	-0,137
Saturação por Al (m)	***0,854***	-0,067	-0,175	0,040	-0,015	0,015
Relação Ca/Mg	***0,792***	-0,093	0,049	0,047	-0,012	-0,024
Resistência do solo à penetração (RP)	-0,184	0,698	-0,175	-0,351	0,165	0,020
Densidade do solo (Ds)	-0,310	0,518	0,110	-0,561	0,109	-0,068
Macroporosidade do solo (Mac)	-0,325	-0,130	0,229	***0,830***	0,132	0,009
Microporosidade do solo (Mic)	0,150	-0,026	-0,333	-0,426	0,711	0,315

Porosidade total do solo (Pt)	-0,272	-0,139	-0,001	0,555	***0,701***	0,253
Diâmetro médio geométrico (DMG)	0,505	-0,301	-0,131	0,013	-0,153	0,044
Minhocas	-0,551	-0,021	0,521	-0,354	0,169	-0,404
Abundância de organismos	-0,273	***0,733***	0,067	-0,035	0,217	-0,368
Riqueza de ordens	-0,351	-0,413	0,248	-0,468	0,202	-0,369
Índice de dominância de Simpson (Is)	-0,330	***0,871***	-0,025	0,298	-0,027	-0,369
Índice de diversidade de Shannon (H)	0,334	***-0,866***	0,037	-0,316	0,035	0,008
Índice de uniformidade de Pielou (J)	0,332	***-0,870***	0,033	-0,270	0,035	0,101

Legenda: * Valores destacados em negrito apresentam carga fatorial > 0,700 para o respectivo componente principal.

Fonte: Diego Armando Amaro Da Silva (2024)

4 CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que os indicadores químicos, físicos e biológicos são capazes de discriminar sistemas de manejo com potencial para elaboração de planos de manejo inteligentes usando ferramentas da agricultura de precisão.

Os sistemas de manejo de inverno ApNFE, ApE e NF apresentaram os maiores índices de qualidade do solo (IQS) entre os sistemas avaliados, destacando principalmente as melhores condições de crescimento radicular em profundidade e o melhor suprimento de nutrientes propiciado por estes sistemas.

Embora o pousio invernal (PO) tenha se apresentado excelente no suprimento de nutrientes as plantas, este foi o sistema de menor IQS observado, possuindo as piores condições de recebimento, armazenamento e suprimento de água, inibindo o crescimento radicular das plantas, além de promover menor conservação do solo e menor atividade biológica entre os sistemas avaliados.

Os indicadores químicos (pHágua, Ca, Mg, CTC, V, Al, H+Al e relação Ca/Mg) foram os mais sensíveis aos sistemas de manejo de inverno utilizados, seguido pelos biológicos (abundância, Is, H e J) e, por último, os físicos (Mac e Pt).

A integração de dados de diferentes indicadores de qualidade do solo permite a formulação de um índice de qualidade do solo (IQS) podendo ser uma grande ferramenta em modelos para agricultura de precisão e digital que visem monitorar aspectos ligados a sustentabilidade.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. Soil fauna. In: **Tropical soil biological and fertility: A Handbook of methods**. 2. ed. Wallingford: C. A. B. International, p. 44-46, 1993.

ANDRÉA, M. M. O uso de minhocas como bioindicadores de contaminação de solos. **Acta Zoológica Mexicana**, v. 2, p. 95-107, 2010.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; MITCHELL, J. P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 90, p. 25-45, 2002a.

ANDREWS, S. S. et al. On-Farm Assessment of Soil Quality in California's Central Valley. **Agronomy Journal**, v. 94, p. 12-23, 2002b.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F. Adubação nitrogenada em milho implantado em semeadura direta após aveia preta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 4, p. 745-754, out./dez. 1999.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J., (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 123-141. (SSSA Special publication 49).

BROWN, G. G.; DOMÍNGUEZ, J. Uso das minhocas como bioindicadoras ambientais: princípios e práticas – o 3º encontro latino-americano de ecologia e taxonomia de oligoquetas (elaetao3). **Zoológica Mexicana**, v. 2, p. 1-18, 2010.

CAMARGO, R.; PIZA, R. J. Produção de biomassa de plantas de cobertura e efeitos na cultura do milho sob sistema plantio direto no município de Passos, MG. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 3, p. 76-80, jul./set. 2007.

CASALI, C. A. et al. **Mineralização das formas de fósforo do tecido de plantas de cobertura**. Piracicaba: Informações Agronômicas - IPNI. set. 2011. p. 21-24. (Documentos, n. 135)

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2004. 400p .

CUNHA, E. Q. et al. Atributos químicos de solo sob produção orgânica influenciados pelo preparo e por plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 10, p. 1021–1029, 2011.

DALLA NORA, D. et al. Melhoria da qualidade química do perfil do solo sob plantio direto pela adição de gesso e de enxofre elementar isolada ou combinada com calcário e a produtividade das culturas. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 137-138, p. 51-64, 2013.

FABIAN, A. J. **Plantas de cobertura: efeito nos atributos do solo e na produtividade de milho e soja em rotação**. 2009. 83 p. Tese (Doutorado em Agronomia - Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

FERREIRA, D. F.; FILHO, A. C.; LÚCIO, A. D. Procedimentos estatísticos em planejamentos experimentais com restrições na casualização. **Boletim informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.3, p. 16-19, set./dez. 2012.

FRANCHINI, J. C. et al. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Londrina: Embrapa Soja. 2009. 42 p. (Documentos, n. 314)

GIACOMINI, S. J. et al. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 9, p. 1097-1104, 2003a.

GIACOMINI, S. J. et al. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 325-334, 2003b.

JUNG, K. Y. et al. Soil compaction varies by crop management system over a claypan soil landscape. **Soil & Tillage Research**, v. 107, n. 1, p. 1-10, 2010.

KARLEN, D. L.; STOTT, D. E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J. W. et al., (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 53-72. (Special Publication, 35).

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L., eds. **Methods of soil analysis**. Pat 1. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.499-509.

LAVELLE, P. et al. SOM management in the tropics: why feeding the soil macrofauna? **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 61, p. 53-61, 2001.

MAGALHÃES, E. N. et al. Recuperação estrutural e produção do capim-Tifton 85 em um Argissolo Vermelho-Amarelo compactado. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 10, n. 1, p. 68-76, 2009.

MALUF, J. R. T. Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, p. 141-150, 2000.

MARASCA, I. et al. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e teor de água em sistema de plantio direto, na cultura da soja. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 2, p. 239-246, mar./abr. 2011.

MARTINS, R. P. **Decomposição e mineralização de nutrientes de resíduos de plantas de cobertura em solo cultivado com cebola (*Allium cepa* L.)**. 2013. 69 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MELLONI, R. et al. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2461-2470, 2008.

MELO, A. V. et al. Extração de nutrientes e produção de biomassa de aveia-preta cultivada em solo submetido a dezoito anos de adubação orgânica e mineral. **Semina: Ciências Agrárias**,
Londrina, v. 32, n. 2, p. 411-420, abr./jun. 2011.

MELO FILHO, J. F.; SOUZA, A. L. V.; SOUZA, L. S. Determinação do índice de qualidade subsuperficial em um latossolo amarelo coeso dos tabuleiros costeiros, sob floresta natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1599-1608, 2007.

MENEZES, C. E. G. et al. Macrofauna edáfica em estádios sucessionais de floresta estacional semidecidual e pastagem mista em Pinheiral (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, nov./dez. 2009.

MORETI, D. et al. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo, adubações e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n. 1, p. 167-175, jan./fev. 2007.

MUKHERJEE, A.; LAL, R. Comparison of Soil Quality Index Using Three Methods. **Plos One**, Columbus, v. 9, n. 8, p. 1-15, ago. 2014.

NAKAJIMA, T.; LAL, R.; JIANG, S. Soil quality index of a crosby silt loam in central Ohio. **Soil & Tillage Research**, v. 146, p. 323-328, 2015.

PIMENTEL, M. S. et al. Atributos biológicos do solo sob manejo orgânico de cafeeiro, pastagem e floresta em região do Médio Paraíba fluminense-RJ. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 2, p. 85-93, jul./dez. 2006.

PINHEIRO, F. J. et al. Caracterização da macrofauna edáfica na interface solo-serapilheira em uma área de Caatinga do Nordeste brasileiro. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 10, n. 19, p. 2964-2974, 2014.

PRADO, R. M.; ROQUE, C. G.; SOUZA, Z. M. Sistemas de preparo e resistência à penetração e densidade de um Latossolo Vermelho eutrófico em cultivo intensivo e pousio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 12, p. 1795-1801, dez. 2002.

PREVEDELLO, C. L. Novo método para estimativa da umidade do solo na condição de capacidade de campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 23-28, jul.-set. 1999.

SANTI, A. L. et al. Multifuncionalidade de biomassas de cobertura do solo e agricultura de precisão. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 137-138, p. 16-23, 2014.

ISBN 978-65-990392-6-3

SANTI, A. L. et al. Cobertura permanente, estrutura do solo e a garantia de altos rendimentos. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 142-143, p. 20-23, 2015.

SANTOS, C. L. et al. Estimativa da umidade na capacidade de campo em vasos e em laboratório. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 8, n. 2, p.151-160, abr.-jun. 2013.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SANTOS, M. S. et al. Riqueza de formigas (Hymenoptera, Formicidade) da serrapilheira em fragmentos de floresta semidecídua da Mata Atlântica na região do Alto do Rio Grande, MG, Brasil. **Iheringia, Série Zoologia**, Porto Alegre, v. 96, n. 1, p. 95-101, mar. 2006.

SILVA, A. J. et al. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 38, n. 2, p. 118-127, jun. 2008.

SILVA, E. A. A. et al. Um Estimador robusto e o semivariograma cruzado na análise de variabilidade espacial de atributos do solo e planta. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 25, n. 2, p. 365-371, 2003.

STEFFEN, R. B.; ANTONIOLLI, Z. I.; STEFFEN, G. P. K. Avaliação de substratos para reprodução de colêmbolos nativos em condições de laboratório. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 3, p. 265-269, 2007.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TISDALL, J. M.; COCKROFT, B.; UREN, N. C. The stability of soil aggregates as affected by organic materials microbial activity and physical disruption. **Soil Research,** Victoria, v.16, p. 9-17, 1978.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 743-755, jul./ago. 2009.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Transactions of the America Society of Agricultural Engineering**, v. 4, p. 242-246, 1961.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 21

INPUT DE DIFERENTES VARIÁVEIS COMO ESTRATÉGIA NA DELIMITAÇÃO DE ZONAS DE MANEJO EM VINHEDOS DA CAMPANHA GAÚCHA

Input of Different Variables as a Strategy for Delimiting Management Zones in Vineyards of the Campanha Gaúcha

Bruna Trevizan Paese[1]; Jean Michel Moura Bueno[1]; Gustavo Brunetto[1]; Ricardo Simão Diniz Dalmolin[1]; Lúcio de Paula Amaral[1]; Fabrício de Araújo Pedron[1]; Noeme da Costa Santos[1]; Luís Felipe Rech[1]

[1] Departamento de Solos; Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, nº 1000, Camobi, CEP 97105-900, Santa Maria- RS, Brasil, brunatpaese@hotmail.com; bueno.jean1@gmail.com; brunetto.gustavo@gmail.com; dalmolin@ufsm.br; lucio.amaral@ufsm.br; fapedron@ufsm.br; ncsnoeme@gmail.com; lf.r3ch@gmail.com

RESUMO

Este estudo teve como objetivo caracterizar e mapear a variabilidade espacial de classes de solo, atributos edáficos e foliares, variáveis topográficas e produtividade de uva *Vitis vinífera* em vinhedo da Campanha Gaúcha. Foram descritos perfis de solo, realizadas amostragens em grade georreferenciada e análises químicas e físicas de solo e tecido foliar. A produtividade foi avaliada em duas safras (2023/2024 e 2024/2025). As variáveis topográficas foram obtidas a partir do Modelo Digital do Terreno (MDT) derivado de levantamento com Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS/DRONES), e os modelos preditivos foram ajustados por Random Forest. A integração dos dados em ambiente R, com uso de análise multivariada e algoritmo K-Means, possibilitou a delimitação de três zonas de manejo (alta, média e baixa produtividade). Os resultados evidenciam o potencial da Viticultura de Precisão na definição de estratégias diferenciadas de manejo, contribuindo para maior eficiência produtiva e sustentabilidade da viticultura regional.

Palavras-chave: Viticultura de precisão. Mapeamento Digital de Solos. Análise Multivariada de Dados.

ABSTRACT

This study aimed to characterize and map the spatial variability of soil classes, edaphic and foliar attributes, topographic variables, and grape (Vitis vinifera) yield in a vineyard in the Campanha Gaúcha region. Soil profiles were described, samples were collected on a georeferenced grid, and chemical and physical analyses were carried out on soil and leaf tissues. Yield was evaluated in two growing seasons (2023/2024 and 2024/2025). Topographic variables were derived from a Digital Terrain Model (DTM) obtained through surveys with Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS/DRONES), and predictive models were fitted using Random Forest. Data integration in R, combined with multivariate analysis and the K-Means algorithm, allowed the delineation of three management zones (high, medium, and low productivity). The results highlight the potential of Precision Viticulture for defining site-specific management strategies, contributing to greater productive efficiency and sustainability of regional viticulture.

Keywords: Precision viticulture. Digital Soil Mapping. Multivariate Data Analysis.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

A viticultura destaca-se mundialmente pela relevância econômica e sociocultural, ocupando 7,2 milhões de hectares em 2023 (OIV, 2024). No Brasil, a área cultivada alcançou 83 mil hectares, com o Rio Grande do Sul respondendo por 73% da produção nacional (MELLO; MACHADO, 2022). Na Campanha Gaúcha, nova fronteira vitivinícola, a produção anual atinge cerca de 10 milhões de garrafas e valor superior a R$ 500 milhões (ASSOCIAÇÃO DOS VINHOS DA CAMPANHA GAÚCHA, 2022).

O solo exerce papel determinante na qualidade da uva, influenciando crescimento radicular, nutrição e disponibilidade hídrica (ANDRÉS-DE PRADO et al., 2007; INDA; NASCIMENTO; GIASSON, 2024). A diversidade pedológica do Sul do Brasil – Latossolos, Argissolos, Cambissolos, Luvissolos e Neossolos – afeta tanto a fertilidade quanto a composição fenólica das bagas, com destaque para os solos arenosos e pobres da Campanha (MELO; ZALAMENA, 2016; BASSO; CERETTA; SILVA, 2019).

A variabilidade espacial de atributos edáficos e topográficos demanda estratégias de Agricultura de Precisão (AP), como a Viticultura de Precisão (VP), que integra sensoriamento remoto, SIG e geoestatística para definir zonas de manejo (MOLIN et al., 2015; FILIPPINI-ALBA et al., 2022; GATTI et al., 2022; FIORENTIN et al., 2025). Essas abordagens permitem intervenções localizadas em adubação, manejo hídrico e correção da acidez, mas ainda são pouco aplicadas em vinhedos brasileiros (DAVATGAR et al., 2012; PACCIORETTI et al., 2020).

Assim, este estudo objetiva caracterizar e mapear a variabilidade espacial de classes de solo, nutrientes, variáveis topográficas e produtividade para delimitação de zonas de manejo em vinhedos da Campanha Gaúcha.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em vinhedo comercial de Pinot Noir (*Vitis vinífera*) da Vinícola Salton, localizado em Santana do Livramento, Campanha Gaúcha (RS), sob clima Cfa segundo Köppen (ALVARES et al., 2013). O relevo é suavemente ondulado e o vinhedo, implantado em 2002, ocupa 10 ha, conduzido em espaldeira com porta-enxerto Paulsen 1103. As avaliações ocorreram nas safras 2023/2024 e 2024/2025, sendo adotada poda de produção durante a dormência.

2.2 COLETA, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

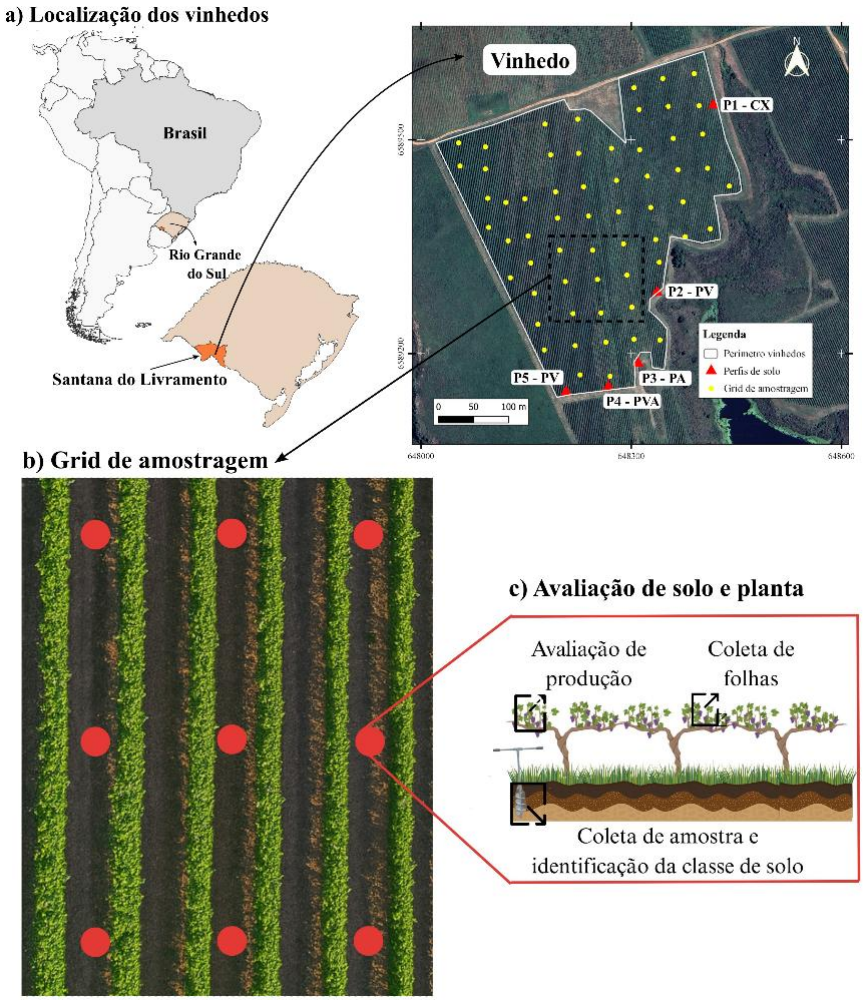
2.2.1 Classificação de solo e amostragem de solo e folha

Os pontos de descrição de perfis foram definidos a partir de curvas de nível (5 m de equidistância), buscando representar a variabilidade da paisagem. Foram descritos cinco perfis (Figura 1a), e classificados até o 4º nível do SiBCS (SANTOS et al., 2018).

A variabilidade espacial foi avaliada em grade georreferenciada com 62 pontos (Figura 1b). O solo foi coletado na linha de cultivo, a 0–20 cm de profundidade, e sondagens com trado holandês permitiram identificar a classe até o 2º nível do SiBCS. Nos mesmos pontos, realizaram-se amostragens foliares em três plantas, coletando

10 folhas opostas ao cacho no florescimento, formando amostra composta por ponto, conforme recomendações do Manual de Calagem e Adubação para RS/SC (CQFS-RS/SC, 2016).

Figura 1- Localização do vinhedo onde foi conduzido o estudo (a), detalhamento do grid de amostragem (b) e avaliações de solo e planta (c).



Fonte: Autor (2025).

2.2.2 Análises físicas e químicas do solo e folhas

As amostras de solo (0 - 20 cm e horizontes dos perfis) foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas (2 mm), sendo submetidas às análises químicas de P, K, Ca^{2+}, Mg^{2+}, pH em água, Al^{3+} e H+Al (TEDESCO et al., 1995) e à análise granulométrica pelo método da pipeta (TEIXEIRA et al., 2017).

As amostras foliares foram lavadas, secas a 65 °C até massa constante e moídas (<2 mm). O teor de N total foi obtido por digestão sulfúrica (TEDESCO et al., 1995), enquanto P, K, Ca e Mg foram quantificados após digestão nitroperclórica (EMBRAPA, 2009).

2.2.3 Avaliação da produtividade de uva

Nas duas safras, a colheita ocorreu em fevereiro, no estágio de maturação fisiológica. Em cada ponto amostral, nas três plantas previamente selecionadas para

coleta foliar, contou-se o número de cachos e colheram-se três por planta, que foram pesados em balança de precisão para estimar a produtividade por planta e por área.

2.2.4 Definição de Zonas de Manejo

2.2.4.1 Obtenção das variáveis de terreno

As variáveis topográficas foram derivadas de um Modelo Digital do Terreno (MDT, 5 m de resolução) obtido por levantamento aerofotogramétrico com Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS/DRONES) equipado com câmera RGB. Cinco pontos de controle foram georreferenciados com receptor GNSS via aplicativo Polaris Connect, assegurando alta acurácia. O processamento fotogramétrico foi realizado no software Agisoft Metashape.

A partir do MDT, calcularam-se quatro variáveis morfométricas no SAGA GIS (OLAYA, 2004): elevação, distância à rede de drenagem (DRD), índice de umidade do terreno (IUT) e fator LS. Esses atributos compuseram o conjunto de variáveis topográficas utilizadas na modelagem da variabilidade espacial de solo, planta e produtividade.

2.2.4.2 Modelos de variabilidade espacial

A variabilidade espacial de classes de solo, nutrientes no solo e folhas, e produtividade foi avaliada por meio de mapas de Mapeamento Digital de Solos – MDS (MCBRATNEY et al., 2003; DALMOLIN; TEN CATEN, 2015). A predição das classes de solo (2º nível do SiBCS) considerou os perfis descritos e as identificações da malha amostral (n = 62).

Os modelos foram gerados pelo algoritmo Random Forest (BREIMAN, 2001; LIAW; WIENER, 2002), com 17 variáveis topográficas como covariáveis preditoras, implementado no R (R CORE TEAM, 2021) via pacote caret (KUHN, 2016).

A acurácia da predição de classes foi avaliada por matrizes de confusão com validação cruzada (BRUS et al., 2011), obtendo-se acurácia geral (AG) e por classe (AC) (CONGALTON, 1991). Para nutrientes e produtividade, o desempenho foi avaliado por R^2, RMSE e MAE (MCBRATNEY et al., 2003; KHOSGOFTARMANESH et al., 2018). Valores de $R^2 > 0,60$ foram considerados aceitáveis, entre 0,70–0,85 bons e acima de 0,85 excelentes, observando-se cautela quanto ao sobre ajuste. RMSE e MAE foram analisados em relação à média observada, sendo desejável que representassem <20%. Todas as análises foram realizadas no ambiente R (R CORE TEAM, 2022).

2.2.4.3 Estruturação e integração da base de dados para delimitação da ZM

Foi estruturado um banco de dados integrando variáveis de solo (MO, P, K, Ca, Mg), folha (N, P, K, Ca, Mg), produtividade e topográficas (elevação, DRD, IUT, fator LS). As zonas de manejo (ZM) foram delimitadas pela classificação não supervisionada dos pontos amostrados via algoritmo K-Means, no ambiente R com o pacote paar (PACCI0RETTI et al., 2024).

O número ótimo de clusters foi definido a partir do coeficiente de partição (PC), da entropia da partição (PE) e de um índice composto de desempenho, considerando a maximização do PC e a minimização da PE e do índice composto (FRIDGEN et al., 2004; ALBORNOZ et al., 2018).

ISBN 978-65-990392-6-3

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MODELOS DE PREDIÇÃO

3.1.1 Modelos de predição de classes de solo

A acurácia dos modelos variou entre 63% e 78%, destacando-se os Argissolos Vermelhos (78%), seguidos pelos Argissolos Vermelho-Amarelos (75%), Cambissolos Háplicos (65%) e Argissolos Amarelos (63%), com acurácia geral de 75% (Tabela 1).

Tabela 4- Acurácia das predições de classes de solo.

Classes de solo	Acurácia por classes de solo (%)	Acurácia geral (%)
Argissolo Vermelho	78	75
Argissolo Vermelho-Amarelo	75	
Argissolo Amarelo	63	
Cambissolo Háplico	65	

Fonte: Autor (2025).

3.1.2 Modelos de predição de nutrientes no solo e folha

Os modelos apresentaram alto desempenho, com R^2 de 0,90–0,94 para nutrientes do solo e 0,90–0,95 para nutrientes foliares (Tabela 2). A predição da produtividade também foi consistente, com R^2 de 0,95 e 0,94 nas duas safras (Tabela 3).

Tabela 5- Desempenho dos modelos preditivos para nutrientes no solo e folhas, com base nos coeficientes de determinação (R^2), erro quadrático médio (RMSE) e erro absoluto médio (MAE) no vinhedo.

Variável de solo	R^2	RMSE	MAE
MO (%)	0,91	0,09	0,07
P (mg dm^{-3})	0,90	8,25	6,21
K (mg dm^{-3})	0,92	7,88	5,86
Ca (cmolc dm^{-3})	0,94	0,12	0,09
Mg (cmolc dm^{-3})	0,94	0,07	0,05
Variável de folha	**R^2**	**RMSE**	**MAE**
N (g kg^{-1})	0,94	0,52	0,42
P (g kg^{-1})	0,90	0,39	0,29
K (g kg^{-1})	0,95	2,02	1,57
Ca (g kg^{-1})	0,92	0,66	0,49
Mg (g kg^{-1})	0,93	0,14	0,11

Fonte: Autor (2025).

Tabela 3- Desempenho dos modelos preditivos para produtividade, com base nos coeficientes de determinação (R^2), erro quadrático médio (RMSE) e erro absoluto médio (MAE) no vinhedo.

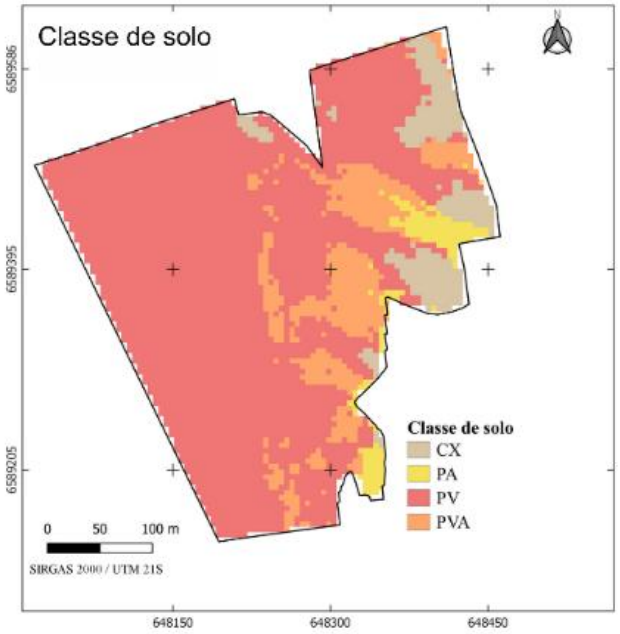
Variável	R^2	RMSE	MAE
Produção de uva (2023-2024)	0,95	1,21	0,92
Produção de uva (2024-2025)	0,94	1,62	1,28

Fonte: Autor (2025).

3.2 VARIABILIDADE DE CLASSES DE SOLO

O mapa de classes (Figura 2) indicou quatro unidades no vinhedo. O Argissolo Vermelho (PV) predominou, com 56% da área, seguido pelo Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA, 22%), mais frequente na porção leste. O Cambissolo Háplico (CX) representou 12%, concentrado no nordeste, enquanto o Argissolo Amarelo (PA) ocupou 10% no setor sudeste.

Figura 2- Mapa de variabilidade de classes de solo do vinhedo.

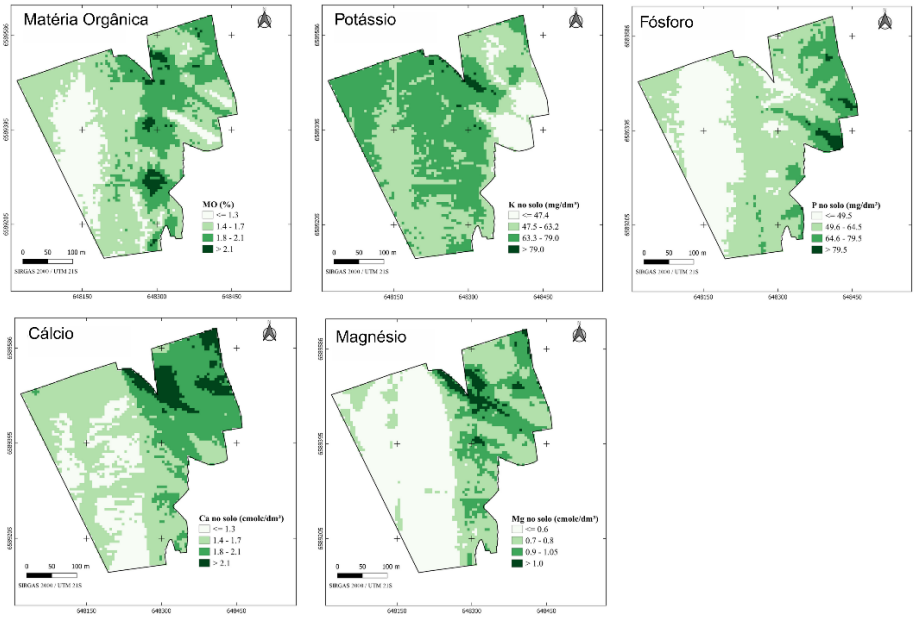


Legenda: CX – Cambissolo Háplico; PA – Argissolo Amarelo; PV – Argissolo Vermelho; PVA – Argissolo Vermelho-Amarelo.
Fonte: Autor.

3.3 VARIABILIDADE DE NUTRIENTES NO SOLO E FOLHA

Os nutrientes do solo apresentaram alta heterogeneidade (Figura 3). A matéria orgânica (MO) variou de 1,3–2,1%, com maiores teores em áreas úmidas e próximas à drenagem. O fósforo (P, 49,5–79,5 mg dm^{-3}) concentrou-se em porções leste e nordeste, enquanto o potássio (K, 47,4–79,0 mg dm^{-3}; média 61,4) predominou no centro e noroeste. O cálcio (Ca, 1,3–2,1 cmolc dm^{-3}) e o magnésio (Mg, 0,6–1,0 cmolc dm^{-3}) predominaram em áreas baixas e pouco declivosas.

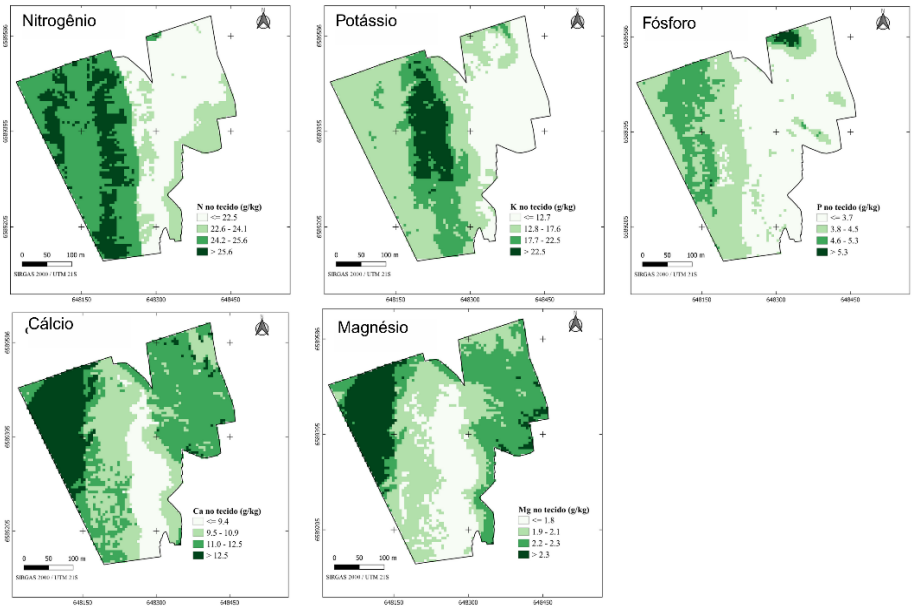
Figura 3. Mapa da variabilidade de nutrientes no solo.



*MO: %; P: mg dm⁻³; K: mg dm⁻³; Ca: cmolc dm⁻³; Mg: cmolc dm⁻³
Fonte: Autor (2025).

Nos nutrientes foliares (Figura 4), o nitrogênio (N, 22,5–25,6 g kg⁻¹) foi mais elevado no oeste e noroeste, enquanto o P (3,7–5,3 g kg⁻¹) concentrou-se no oeste. O K (12,7–22,5 g kg⁻¹) destacou-se no centro-leste; Ca (9,4–12,5 g kg⁻¹) e Mg (1,8–2,3 g kg⁻¹) predominaram em áreas de topo e meia-encosta no oeste e noroeste. A produtividade variou entre safras (Figura 5): em 2023–2024, de 6,3–8,3 ton ha⁻¹, concentrando-se no centro-sul e noroeste; em 2024–2025, aumentou para 8,3–11,1 ton ha⁻¹, com maiores valores no centro-leste e nordeste.

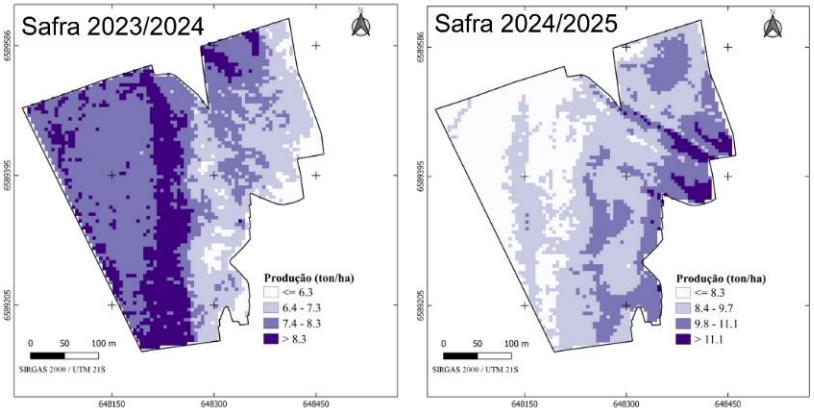
Figura 4. Mapa da variabilidade de nutrientes no tecido foliar.



*N: g kg⁻¹; P: g kg⁻¹; K: g kg⁻¹; Ca: g kg⁻¹; Mg: g kg⁻¹
Fonte: Autor (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 5. Variabilidade de produção na safra 2023 – 2024 e 2024 – 2025.



*Produtividade: ton ha^{-1}
Fonte: Autor (2025).

3.4 DELIMITAÇÃO DE ZONAS DE MANEJO EM VINHEDOS

A definição do número de zonas de manejo foi baseada nos índices PC, PE e índice composto, sendo adotada a segmentação em três clusters (PC = 0,965; PE = 0,062; índice = 1,22), pela maior qualidade de agrupamento (Tabela 4).

As zonas foram classificadas como alta, média e baixa produtividade (Figura 6). A zona de alta produtividade (25% da área), predominante em PV (85%), apresentou média de 9,0 ton ha^{-1}. A zona média (35%), restrita a PV, registrou 8,1 ton ha^{-1}, refletindo variabilidade intra-classe ligada a relevo e teor de argila. A zona de baixa produtividade (40%) incluiu PV (47%), PVA (25%), PA (9%) e CX (19%), com média de 7,3 ton ha^{-1}, destacando limitações de drenagem no PA e baixa profundidade do CX (Tabela 5).

Tabela 4- Análise dos índices de validação do método K-Means para diferentes números de clusters nos vinhedos 1 e 2.

Número de cluster	Coeficiente de partição	Entropia da partição	Resumo do índice
2	0,917	0,143	1,58
3	**0,965**	**0,062**	**1,22***
4	0,911	0,156	1,56
5	0,922	0,141	1,48
6	0,11	0,162	1,70

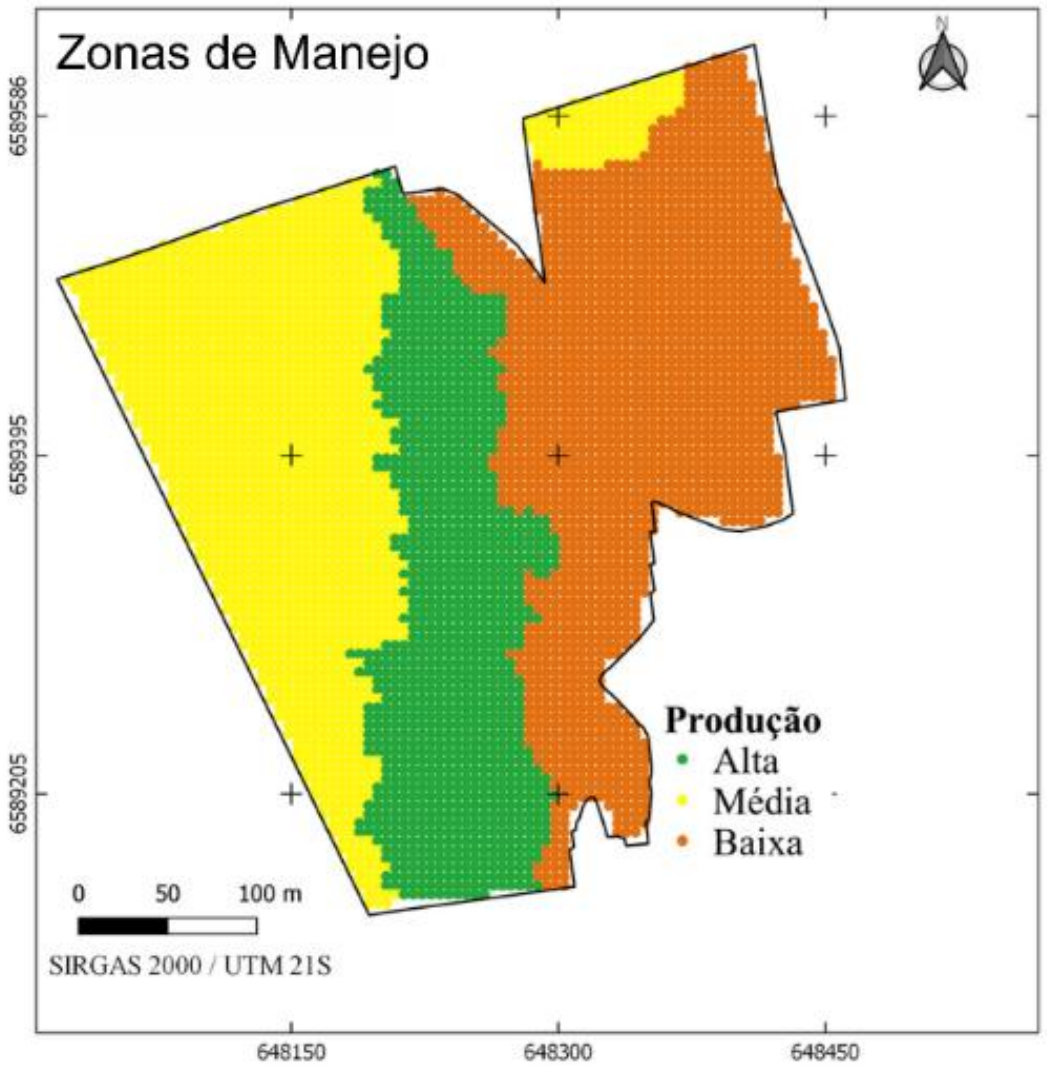
* Destacado em negrito o número de clusters definido como o mais adequado de acordo com o menor valor do índice.
Fonte: Autor (2025).

Tabela 5- Distribuição do percentual de área nas faixas de produtividade e das classes de solo nas zonas de manejo delimitadas.

ZM	Porcentagem de área (%)	Produtividade média (ton ha^{-1})	Porcentagem de cada classe de solo (%)			
			PV	PVA	PA	CX
Alta	25	9,0	85	14	0	1
Média	35	8,1	100	0	0	0
Baixa	40	7,3	47	25	9	19

Fonte: Autor (2025).

Figura 6. Definição de zonas de manejo em vinhedo.



Fonte: Autor (2025).

3.5 VARIÁVEIS CLIMÁTICAS

Durante o período de florescimento da videira, compreendido entre o final de outubro e o início de novembro, foram registradas diferenças expressivas nos volumes de precipitação entre as duas safras avaliadas (Tabelas 6 e 7), as quais podem ter contribuído para a variabilidade observada na produtividade dos vinhedos. Na safra 2023 – 2024 (Tabela 6), os totais pluviométricos foram de 119,4 mm em outubro e 281,8 mm em novembro, enquanto na safra 2024 – 2025 (Tabela 7) os valores foram de 232,8 mm e 131,4 mm, respectivamente.

Tabela 6- Precipitação e temperatura observadas na safra de 2023/2024 em Sanata do Livramento – RS.

Safra 2023 – 2024				
Mês	Precipitação	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
	mm		°C	
Março	143,6	23,75	24,45	23,07
Abril	8,2	17,74	18,41	17,06
Maio	53,6	15,61	16,26	14,97
Junho	51,2	13,84	14,42	13,29
Julho	63,8	12,57	13,07	12,06
Agosto	79,6	14,01	14,67	13,32
Setetembro	256,8	15,78	16,34	15,33
Outubro	119,4	16,86	17,53	16,23
Novembro	281,8	19,99	20,55	19,44
Dezembro	292,6	21,82	22,43	21,25
Janeiro	43,0	22,86	23,57	21,55
Fevereiro	38,0	23,68	24,00	24,04
	1431,6*	18,21**	18,81**	17,63**

*Acumulado de precipitações; **Média de temperaturas.
Fonte: Dados da estação meteorológica de Santana do Livramento - https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos

Tabela 7- Precipitação e temperatura observadas na safra de 2024/2025 em Sanata do Livramento – RS.

Safra 2024 – 2025				
Mês	Precipitação	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
	mm		°C	
Março	214,4	21,68	22,31	21,06
Abril	331,6	18,91	19,38	18,45
Maio	141,4	13,09	13,60	12,57
Junho	4,6	14,37	14,90	13,71
Julho	22,2	10,69	11,35	10,10
Agosto	22,0	12,34	12,94	11,75
Setetembro	222,8	16,21	16,75	15,65
Outubro	232,8	18,43	19,04	17,85
Novembro	131,4	20,75	21,38	20,15
Dezembro	117,6	20,5	21,23	19,82
Janeiro	72,0	23,57	24,35	22,8
Fevereiro	82,2	24,80	25,53	24,05
	1595,0*	17,95**	18,56**	17,33**

*Acumulado de precipitações; **Média de temperaturas.
Fonte: Dados da estação meteorológica de Santana do Livramento - https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos

3.6 DISCUSSÕES

A análise pedológica evidenciou alta variabilidade de classes de solo no vinhedo, com predominância de Argissolos Vermelhos, Vermelho-Amarelos e Amarelos (PV, PVA, PA) e, em menor proporção, Cambissolos (CX), padrão consistente com o observado na região (PEDRON; DALMOLIN; FLORES, 2019; DALMOLIN; PEDRON; FLORES, 2019). As diferenças no comportamento nutricional das videiras não se devem apenas à disponibilidade de nutrientes no solo, mas também à capacidade de absorção, condicionada pelas propriedades físicas, químicas e morfológicas de cada classe.

O N apresentou teores foliares adequados, de 23,9 g kg^{-1} no vinhedo (BRUNETTO et al., 2025a), favorecidos pela predominância de solos profundos e bem ou moderadamente drenados (PV e PVA), que estimulam a mineralização da matéria orgânica, mesmo em baixos teores na Campanha Gaúcha (CUNHA; MENDES; GIONGO, 2015; TASSINARI et al., 2022; STEFANELLO et al., 2023). Nos PA, de

drenagem imperfeita, os teores foliares também se mantiveram elevados, possivelmente pelo efeito de adubações e pela eficiente redistribuição e translocação de N na planta (MILLARD, 1995; ZHAO et al., 2024).

O P apresentou teores elevados no solo (54,4 mg dm^{-3}; referência 20,2–30,6 mg dm^{-3}) (BRUNETTO et al., 2025b) e foliares adequados (3,86 g kg^{-1}; referência 2,9–3,8 g kg^{-1}) (BRUNETTO et al., 2025a), indicando boa eficiência de absorção, mesmo em áreas com drenagem restrita (PA e CX), onde limitações físicas e fixação em óxidos de Fe e Al reduzem a biodisponibilidade (JOHAN et al., 2021). Por se tratarem de pequenas porções da área, tais restrições não comprometeram a absorção geral.

O K apresentou correspondência positiva entre solo e folha, com teores foliares adequados (12,34 g kg^{-1}; referência 11,0–14,0 g kg^{-1}) (BRUNETTO et al., 2025a) e disponibilidade moderada no solo (61,4 mg dm^{-3}; referência 65,9–76,0 mg dm^{-3}) (BRUNETTO et al., 2025b). A absorção foi favorecida nos PV e PVA, pela boa estrutura e drenagem, enquanto nos CX e PA, a menor profundidade efetiva e o acúmulo hídrico podem limitar o aproveitamento (TIAN et al., 2025; CID; TEIXEIRA, 2017).

Para Ca e Mg, os teores no solo foram elevados (1,7 cmolc dm^{-3}; referência 0,9–1,4 para Ca e 0,2–0,4 para Mg) (BRUNETTO et al., 2025b), mas insuficientes nas folhas (Ca: 11,06 g kg^{-1}; referência 12,0–16,0 g kg^{-1}; Mg: 1,98 g kg^{-1}; referência 2,6–3,3 g kg^{-1}) (BRUNETTO et al., 2025a), sobretudo em PA mal drenados, com baixa porosidade e alta saturação por Al+3, que dificultam a absorção (LIMA FILHO, 2020).

Adicionalmente, os solos arenosos da Campanha Gaúcha apresentam alta suscetibilidade à degradação física e à erosão, especialmente em áreas declivosas, pouco vegetadas ou mal manejadas (SUZUKI et al., 2019). Sua textura arenosa e estrutura pouco estável favorecem escoamento superficial e lixiviação de nutrientes, exigindo manejo conservacionista intensivo, com práticas como cobertura permanente, adubação parcelada e correções localizadas (BASSO; CERETTA; SILVA, 2019).

As diferenças nos volumes de precipitação durante o florescimento possivelmente influenciaram a variabilidade da produtividade, tanto pela limitação da polinização e vingamento (CONCEIÇÃO; MANDELLI, 2009) em condições de excesso de umidade quanto pelo aumento da pressão de doenças fúngicas, que demandaram maior uso de fungicidas cúpricos (BRUNETTO, et al., 2014).

A aplicação integrada de ferramentas como o MDS, VP, levantamento aerofotogramétrico com RPAS, e a delimitação de zonas de manejo via K-Means, permitiu traduzir a complexa variabilidade edáfica, nutricional e produtiva do vinhedo em informações operacionais. A incorporação de variáveis topográficas derivadas de MDT de alta resolução contribuiu para explicar padrões espaciais de fertilidade e produz

tividade, ampliando a capacidade preditiva dos modelos (R^2 acima de 0,90) e na delimitação de ZM. Essa abordagem viabiliza intervenções localizadas, como a adubação em taxa variável, a correção de acidez direcionada e o manejo hídrico específico, que além de aumentar a eficiência do uso de insumos, têm potencial para reduzir custos e impactos ambientais, alinhando a viticultura regional a práticas mais sustentáveis e competitivas (MALEKI et al., 2023; KHANAL et al., 2018).

4 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a integração de classes de solo, atributos edáficos, variáveis topográficas e estado nutricional possibilita compreender a variabilidade espacial em vinhedos da Campanha Gaúcha. A aplicação conjunta de MDS, VP e RPAS gerou bases robustas para delimitação multivariada de Zonas de Manejo (ZM), evidenciando que a produtividade resulta da interação de fatores ambientais e nutricionais.

A delimitação de ZM mostrou alto potencial para apoiar decisões como colheita seletiva, manejo nutricional diferenciado e avaliações de terroir, contribuindo para maior eficiência produtiva e sustentabilidade. Essa estratégia é aplicável não apenas à Campanha Gaúcha, mas também a outros polos vitivinícolas, como a Serra Gaúcha.

Recomenda-se que estudos futuros integrem variáveis fisiológicas, dados climáticos e novas técnicas de aprendizado de máquina, visando aprimorar a predição de ZM e otimizar a qualidade dos vinhos em sistemas tropicais e subtropicais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pelo suporte institucional e acadêmico ao longo da pesquisa. À Vinícola Salton, pela disponibilização da área experimental e apoio técnico, fundamentais para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

ALBORNOZ, F. et al. Classificación fuzzy de ambientes de producción para el manejo sitio-específico de fertilizantes nitrogenados en trigo pan. **Ciencia del Suelo**, v. 36, n. 1, p. 1–12, 2018.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANDRÉS-DE PRADO, Ruth de; YUSTE, R. M.; SORT, X.; ANDRÉS, L. C.; TORRES, M.; et al.Effect of soil type on wines produced from Vitis vinifera L. cv. Grenache in commercial vineyards. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, p. 779-786, 2007. PMID: 17263474.

ASSOCIAÇÃO DE VINHOS DA CAMPANHA. **Site Vinhos da Campanha**. Disponível em: https://www.vinhosdacampanha.com.br/. Acesso em: 02 abr. 2025.

BASSO, C. J.; CERETTA, C. A.; SILVA, L. S. Manejo da fertilidade dos solos arenosos do Bioma Pampa. In: PEDRON, Fabrício de Araújo; DAMOLIN, Ricardo Simão Diniz (org.). **Solos arenosos do Bioma Pampa brasileiro**. Santa Maria: Ed. UFSM, 2019. cap. 5, p. 185–216.

BREIMAN, L. **Random forests**. Machine Learning, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001.

BRUNETTO, Gustavo et al. Adubação de produção em vinhedos. In: BRUNETTO, Gustavo et al. (org.). **Estratégias de manejo da fertilidade do solo e da nutrição de**

videiras. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2025b. cap. 10, p. 271–312.

BRUNETTO, Gustavo et al. Calagem, adubação e estado nutricional em videiras. In: BRUNETTO, Gustavo (org.). **Atualização técnica sobre calagem e adubação em frutíferas**. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2025a. cap. 19, p. 425-452.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC (CQFS-RS/SC). **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2016. 376 p.

CUNHA, T. J. F.; MENDES, A. M. S.; GIONGO, V. Matéria orgânica do solo. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Org.). **Recurso solo**: propriedades e usos. São Carlos: Cubo, 2015. cap. 9, p. 273–293.
CID, L. P. B.; TEIXEIRA, J. B. **Fisiologia vegetal**: definições e conceitos. Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2017. (Documentos, 356). Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1082840. Acesso em: 7 ago. 2025.

DALMOLIN, R. S. D.; TEN CATEN, A. Mapeamento Digital: nova abordagem em levantamento de solos**. Investigación agrária**. vol. 17, n. 2, p. 77-86, 2015.

DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. de A.; FLORES, C. A. Mapeamento, classificação e potencial de uso agrícola dos solos arenosos do Bioma Pampa. In: PEDRON, Fabrício de Araújo; DALMOLIN, Ricardo Simão Diniz (org.). **Solos arenosos do Bioma Pampa brasileiro**. Santa Maria: Ed. UFSM, 2019. cap. 3, p. 97-146

DAVATGAR, N.; NEISHABOURI M. R.; SEPASKHAH, A. R. Delineation of sitespecific nutrient management zones for a paddy cultivated area based on soil fertility using fuzzy clustering, **Geoderma**, vol. 173-174, p. 111-118, 2012. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.005

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA**. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; Crizel, G. R.; Girardi, C. L.; Flores, C. A. Precision viticulture focusing southern Brazil. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, vol. 9, nº 12, p. 542-553, 2022. https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.912.60

FIORENTIN, Lucas A.; GIANNÌ, Giorgio; LUPIA, Francesca; MANSOURI, Romain. Yield mapping in vineyards using remote sensing and Bayesian hierarchical modeling. **Precision Agriculture**, [S. l.], 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11119-025-10154-2. Acesso em: 26 jun. 2025.

FRIDGEN, J. J. et al. Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 1, p. 100–108, 2004.

GATTI, M. et al. Effects of intra-vineyard variability and soil heterogeneity on vine performance, dry matter and nutrient partitioning. **Precision Agriculture**, v. 23, p. 150-177, 2022.

INDA, A. V.; NASCIMENTO, P. C. do; GIASSON, É. Composição mineral do solo. In: MIGUEL, P.; SCHENATO, R. B. (org.). **Pedologia**: estudos dos solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2024. Cap. 2. ISBN 978-65-5929884-6-3.

JOHAN, Prisca Divra; AHMED, Osumanu Haruna; OMAR, Latifah; HASBULLAH, Nur Aainaa. Phosphorus transformation in soils following co-application of charcoal and wood ash. **Agronomy**, Basel, v. 11, n. 10, p. 2010, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agronomy11102010. Acesso em: 7 ago. 2025.

KHANAL, S. et al. Integration of high resolution remotely sensed data and machine learning techniques for spatial prediction of soil properties and corn yield. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 153, p. 213-225, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.07.016.

KHOSGOFTARMANESH, A. H. et al. Spatial variability and mapping of soil properties using geostatistics and GIS in a semi-arid region of Iran. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, p. 1–13, 2018.

KUHN, M. Building predictive models in R using the caret package. **Journal of Statistical Software**, v. 28, n. 5, p. 1-26, 2008. DOI: 10.18637/jss.v028.i05. Disponível em: https://www.jstatsoft.org/index.php/jss/article/view/v028i05. Acesso em: 11 set. 2025.
LIAW, A.; WIENER, M. Classification and regression by random forest. **R News**, v. 2, n. 3, p. 18-22, 2002.

LIMA FILHO, O. F. de. **Desordens nutricionais em plantas**. Dourados, MS: Embrapa Agropecuária Oeste, 2020. 22 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado Técnico, 257). Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1122027. Acesso em: 08 jul. 2025.

MALEKI, S. et al. Delineation of soil management zone maps at the regional scale using machine learning. **Agronomy**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 445, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13020445. Disponível em: https://www.mdpi.com/article/10.3390/agronomy13020445. Acesso em: 8 ago. 2025.

McBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, n. 1–2, p. 3–52, 2003.

MELLO, L. M. R. de; MACHADO, C. A. E. **Vitivinicultura brasileira**: panorama 2021. Bento Gonçalves, RS: Embrapa Uva e Vinho, 2022. 17 p. (Embrapa Uva e Vinho. Comunicado Técnico, 226). Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1149674. Acesso em: 6 ago. 2025.

MELO, G. W. B. de; ZALAMENA, J. **Retrato da Fertilidade de Solos Cultivados com Videira nas Regiões da Serra e Campanha Gaúcha**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2016. (Comunicado Técnico, 181).

MOLIN, J. P.; et al. Sampling grid size for characterization of the spatial variability of phosphorus and potassium in an Oxisol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol. 50, p. 168-177, 2015. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000200009

MILLARD, P. Internal cycling of nitrogen in trees. **Acta Horticulturae**, Wageningen, n. 383, p. 3-14, 1995.

OLAYA, V. **A gentle introduction to SAGA GIS**. 1.1 ed. Madrid: Olaya Victor; Pineda Javier, 2004.

OIV – International Organisation of Vine and Wine – Intergovernmental Organization. **State of the World Vine and Wine Sector in 2023**. Paris: OIV, 2024. Disponível em: https://www.oiv.int/sites/default/files/2024-

PACCIORETTI, Pablo; CÓRDOBA, Marcelo; BALZARINI, Mónica. FastMapping: Software to create field maps and identify management zones in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 175, p. 105556, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105556. Acesso em: 26 jun. 2025.

PEDRON, F. de A.; DALMOLIN, R. S. D.; FLORES, C. A. Gênese e morfologia dos solos arenosos do Bioma Pampa. In: PEDRON, Fabrício de Araújo; DALMOLIN, Ricardo Simão Diniz (org.). **Solos arenosos do Bioma Pampa brasileiro**. Santa Maria: Ed. UFSM, 2019. cap. 2, p. 51-96.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

STEFANELLO, L.; et al. Phosphorus critical levels in soil and grapevine leaves for South Brazil vineyards: A Bayesian approach. **European Journal of Agronomy**, 144, 126752, 2023.

SUZUKI, l. e. a. s.; REICHERT, j. m.; REINERT, d. j.; RODRIGUES, m. f.. Caracterização física dos solos arenosos do Bioma Pampa. In: PEDRON, Fabrício de Araújo; DAMOLIN, Ricardo Simão Diniz (org.). **Solos arenosos do Bioma Pampa brasileiro**. Santa Maria: Ed. UFSM, 2019. cap. 4, p. 147–184.

TASSINARI, A.; et al. Nitrogen critical level in leaves in ‘chardonnay’ and ‘pinot noir’ grapevines to adequate yield and quality must. **Agronomy**, 2022, 12, 5, 1132, 2022.

TEDESCO, J. M. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G.; 2017. **Manual of soil analysis methods**. third ed. Embrapa, Brasília.

TIAN, Lei; CHEN, Yining; ZHOU, Guangsheng; ZHANG, Lijuan; LI, Rong. Soil depth, rather than hydrological gradient, dominates uptake of water and nitrogen by Carex thunbergii in a wetland ecosystem. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 298, p. 108720, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecss.2025.108720.

ZHAO, Qingzhou et al. Nitrogen redistribution and seasonal trait fluctuation facilitate plant N conservation and ecosystem N retention. **Journal of Ecology**, v. 112, p. 501–513, 2024. DOI: https://doi.org/10.1111/1365-2745.14246.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 22

DIAGNÓSTICO DA ADUBAÇÃO E CORREÇÃO DO SOLO ATRAVÉS DE TAXA VARIÁVEL EM PROPRIEDADE LOCALIZADA NO VALE DO ARAGUAIA

Reflection of fertilization and soil correction through variable rate on property located in the Araguaia Valley

Nicole Bonini[1]; Antônio Luis Santi[1]; Higor Juliano Pretto Dapper[1]; Renan da Rosa[1]; Gilvan Moisés Bertollo[1]; André Felipe De Conti[1]; Vitor Eduardo Schardong[1]; Julio Gustavo Buchholz[1]

[1] Universidade Federal de Santa Maria – Campus Frederico Westphalen – Departamento de Ciências Agrárias, BR386 Km Linha 7 de Setembro, 98400000, Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul, Brasil, nicole.bonini@acad.ufsm.br, santi_pratica@yahoo.com, renandarosa1@gmail.com, gilvan.bertollo@ufsm.br, decontiagro@gmail.com, via.maus@gmail.com, schardong.vitor@acad.ufsm.br, julio.buchholz@acad.ufsm.br.

RESUMO

A Agricultura de Precisão (AP) é uma forma de gerir a fertilidade do solo através da utilização de conhecimento técnico e tecnologia, contribuindo para o diagnóstico e melhoria da fertilidade dos solos do cerrado, caracterizados pela baixa fertilidade natural. Este projeto teve como objetivo avaliar os efeitos da adubação e correção do solo em taxa variável sobre a fertilidade do solo no município de Querência-MT. Conduzido em 5 anos sequenciais, iniciando em 2018, foram realizadas coletas de solo georreferenciadas, mapas de fertilidade e de recomendação em taxa fixa, na safra de 2019 – 2020 ocorreu a implantação de correção e adubação com taxa variável. Visualizou-se de forma geral a homogeneização dos teores dos nutrientes analisados, com P e o Ca apresentando maior homogeneização com aplicação em taxa variável, o Mg foi trabalhado com maior ênfase e apresentou maior variação comparado ao P e ao Ca. O K teve maior heterogeneidade em todos os anos analisados. A diminuição da quantidade de fertilizante não foi correlata as médias de produção. Porém, o aumento é justificado por diversos fatores edafoclimáticos, entre eles o adequado aporte de nutrientes para o crescimento e desenvolvimento das plantas.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. Solos do Cerrado. Fertilidade do Solo.

ABSTRACT

Precision Agriculture (PA) is a way to manage soil fertility through the use of technical knowledge and technology, and can contribute to the diagnosis and improvement of the fertility of Cerrado soils, which are characterized by low natural fertility. This project aimed to evaluate the effects of variable-rate fertilization and soil correction on soil fertility in the municipality of Querência, MT. Conducted over 5 sequential years, starting in 2018, georeferenced soil sampling, fertility maps, and fixed-rate recommendations were carried out. In the 2019–2020 harvest, variable-rate correction and fertilization were implemented. Overall, the homogenization of the analyzed nutrient concentrations was observed, with P and Ca showing the greatest homogenization. Mg was worked with greater emphasis and showed greater variation compared to P and Ca. K had greater heterogeneity in all years analyzed. The

decrease in the amount of fertilizer was not correlated with average production. However, the increase is justified by various edaphoclimatic factors, including the adequate supply of nutrients for plant growth and development.

Keywords: Precision Agriculture. Cerrado Soils. Soil Fertility.

1 INTRODUÇÃO

Verificou-se uma problemática global sobre o agronegócio na última década, o aumento do custo de produção, trazendo a necessidade de utilizar assertivamente os corretivos, fertilizantes e defensivos agrícolas. “A obtenção de elevados rendimentos é uma necessidade em função dos altos custos de produção e a crescente competitividade a que todos os produtores estão sujeitos no mundo a cada dia mais globalizado” (SANTI, et al, 2016).

Buscando aumentar a produtividade das áreas agricultáveis, desde áreas com histórico longo de produção, áreas de aberturas e áreas degradadas, realizou-se a reformulação de técnicas da agricultura conservacionista em relação aos insumos, onde a mesma preconiza a utilização uniforme de insumos na área total, sem descriminar a heterogeneidade da lavoura. “Essa prática resolve somente as limitações da propriedade no que diz respeito à disponibilização de nutrientes para a cultura, podendo contaminar a água e o solo, além de provocar prejuízos financeiros causados pelo uso excessivo de insumos agrícolas.” (LAMPARELLI, 2016).

Antes mesmo da revolução industrial já se buscava o maior rendimento das culturas, engatinhava assim a Agricultura de Precisão moderna, que teve surgimento no século XX,”… na década de 1980, na Europa e nos EUA, com o desenvolvimento de microcomputadores, sensores e softwares é que a agricultura de precisão tornou-se viável para os produtores”(LAMPARELLI, 2016), dando acesso ao Sistema de Posicionamento Global (GPS), Sistema de Informações Geográficas (GIS), surge adjunto ao sistema informatizado ferramentas para distribuir localizadamente os insumos, a taxa variáveis proporciona cobrir cada particularidade do solo amostrada no processo de coleta de solo, gerando utilização consciente e otimizada de corretivos, fertilizantes e defensivos agrícolas.

Fazer agricultura em solos pobres em nutrientes, como os do Cerrado, exige um bom controle de um dos fatores mais importantes do processo: a correção da fertilidade do solo em níveis desejáveis para garantir a sustentabilidade do negócio agrícola (SOUZA e LOBATO, 1996). A correção desses solos requer níveis elevados de corretivos e fertilizantes, em doses diferentes para pequenas áreas. Por isso, é de suma importância avaliar a agricultura de precisão na correção da fertilidade do solo, analisando o impacto econômico no investimento em equipamentos e no uso racional de insumos, principalmente em solos onde os investimentos são mais acentuados. Isso exige uma maior assertividade nas tomadas de decisão para que o produtor prospere e perdure na geração de alimento.

É de suma importância avaliar a agricultura de precisão sobre a correção da fertilidade do solo, impacto econômico no investimento em equipamentos e uso racional de corretivos e fertilizantes, ainda mais em solos pobres como os do cerrado, onde os investimentos são mais acentuados exigindo uma assertividade em tomadas de decisão maior, para que o produtor prospere e perdure na geração de alimento.

ISBN 978-65-990392-6-3

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O presente experimento foi realizado na região Nordeste do estado de Mato Grosso, no interior do município de Querência. O solo da área experimental foi caracterizado como Latossolo Vermelho-Amarelo (SOUZA; LOBATO, 1996). O clima predominante no município de Querência é AW que segundo a classificação de Köeppen é clima Tropical com inverno seco, apresenta estação chuvosa no verão, de novembro a abril e estação seca no inverno, de maio a outubro, tem como média do mês mais frio temperaturas superiores a 18° e uma precipitação superior a 750 mm, chegando a 1800 mm. O município encontra-se a 336 m de altitude (COMIG, 2019).

2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados

Foi conduzido o experimento em 5 anos sequenciais, dando início em 2018 e com conclusão em 2022, a implantação da agricultura de precisão ocorreu no ano de 2018, com coletas de solo georreferenciadas, mapas de fertilidade e mapas de recomendação em taxa fixa, na safra de 2019 – 2020 ocorreu a implantação de correção e adubação do solo em taxa variável.

Primeiramente foi realizado a coleta de solo utilizando mapa de produção, tomou-se o cuidado em aferir e calibrar a colhedora, evitando erros na geração de dados, o primeiro mapa de produção foi criado na colheita da safra da soja 2017 – 2018, logo após a colheita, se deu a amostragem do solo, as demais coletas se deram da mesma forma.

Tabela 1 - Amostras e seus correspondentes pontos de coleta.

Amostras 2018		Amostras 2019		Amostras 2020		Amostras 2021		Amostras 2022	
Pontos	Amostras	Pontos	Amostras	Pontos	Amostras	Pontos	Amostras	Pontos	Amostras
1 a 5	A01	1 a 6	A01	1 a 6	A01	1 a 8	A01	1 a 7	A01
6 a 11	A02	7 a 12	A02	7 a 13	A02	9 a 15	A02	8 a 14	A02
12 a 21	A03	13 a 18	A03	14 a 21	A03	16 a 22	A03	15 a 23	A03
22 a 31	A04	19 a 28	A04	22 a 26	A04	23 a 31	A04	24 a 30	A04
32 a 38	A05	29 a 34	A05	27 a 32	A05	32 a 39	A05	31 a 38	A05
39 a 48	A06	35 a 41	A06	33 a 38	A06	40 a 48	A06	49 a 47	A06
49 a 58	A07	42 a 50	A07	39 a 46	A07	49 a 58	A07	48 a 54	A07
59 a 68	A08	51 a 56	A08	47 a 52	A08	59 a 66	A08	55 a 62	A08
69 a 74	A09	57 a 62	A09	53 a 58	A09	67 a 75	A09	63 a 79	A09
75 a 84	A10	63 a 69	A10	59 a 63	A10	76 a 85	A10	71 a 78	A10
85 a 93	A11					86 a 91	A11	79 a 85	A11
94 a 101	A12							86 a 93	A12
102 a 111	A13							94 a 100	A13
112 a 121	A14							101 a 107	A14
122 a 131	A15							108 a 114	A15
132 a 141	A16							115 a 121	A16
142 a 151	A17								
152 a 160	A18								
161 a 167	A19								
168 a 177	A20								
178 a 182	A21								
183 a 192	A22								
193 a 200	A23								
200 a 205	A24								

Legenda: Mapeamento temporal das amostras, com correspondência entre pontos e códigos, de 2018 a 2022.
Fonte: Autores (2025)

A confecção da grade amostral se deu por zonas de manejo conforme metodologia proposta por JUNIOR et al., (2011). Utilizou-se o software de agricultura de precisão (Ag Leader SMS advanced) para carregar o mapa de colheita e adicionar os pontos de coleta, conforme a Tabela 1. A coleta ocorreu com a utilização de sonda amostradora, marreta, saco plástico 25 × 35cm, pincel permanente, smartphone, motocicleta CRF 250 com suporte para carga. Os perímetros dos talhões a serem amostrados já estavam processados no aplicativo Meta campo. Este aplicativo importa e exporta perímetros e grades amostrais, georreferencia áreas através de Sistema de Posicionamento Global (GPS). Em sequência a realização da coleta, o solo foi encaminhado ao laboratório Exata em Rio Verde/Goias para análise química do solo. A partir dos resultados obtidos nos laudos laboratoriais foi realizado o processamento dos dados e a realização de mapas de fertilidade para cada nutriente e juntamente aos mapas, a recomendação em taxa variável.

Para recomendação de calagem foi utilizada a fórmula adaptada do Método baseados nos teores de alumínio, cálcio e magnésio trocáveis (FLORES; CUNHA, 2016), elevando o nutriente de menor quantidade dentro de seus parâmetros desejáveis (elevação de Mg), visando corrigir a relação entre Cálcio e Magnésio, sem aumentar o V% acima 65% e pH acima de 6 (Equação 1).

$$((((((Mg1 - Mg2) \times 2)x100)x1{,}6) \times 2) \div \%MgO) \quad (1)$$

Mg1- Magnésio desejado;
Mg_2 - Magnésio encontrado em cmol/dm³;
%MgO - Porcentagem de Óxido de Magnésio

A recomendação de Óxido de Magnésio foi realizada através da seguinte fórmula:

$$(((((((Mg1 - Mg2) \times 2)x100)x1{,}65) \times 2) \div \%MgO)) \div 5 \quad (2)$$

Mg1 - Magnésio desejado;
Mg_2 - Magnésio encontrado em cmol/dm³;
%MgO - Porcentagem de Óxido de Magnésio

A quantidade de potássio a ser aplicada depende, fundamentalmente, do teor do nutriente no solo, da espécie vegetal a ser cultivada e da expectativa de rendimento a ser obtido (ERNANI et al., 2007). Para a adubação potássica foi utilizada a fórmula de extração de K_2O da cultura, representada a seguir.

$$((Extração\ de\ K2O - (Potássio\ mg/dm^3 \times 2{,}4)\ ) \div 0{,}6) \quad (3)$$

Extração de K_2O – quantidade para produção esperada.
Potássio mg/dm³ - Potássio presente no solo em mg/dm³.

Para a determinação de adubação fosfatada utilizou a seguinte equação:

ISBN 978-65-990392-6-3

$$([Extração\ de\ P2O5] - (Fósforo\ mg/dm^3 \times 2{,}3) \times 2) \div [\%\ de\ P\ na\ fonte] \quad (4)$$

Extração de P_2O_5 – quantidade para produção esperada.
Fósforo mg/dm³ – fósforo presente no solo em mg/dm³.
% de P na fonte – teor de fósforo (P_2O_5) no fertilizante utilizado.

O manejo de adubação foi realizado com a aplicação total dos corretivos e nutrientes em cobertura, no período de seca da região (julho – setembro), que antecipa o período de semeadura (outubro até metade de novembro). As recomendações foram realizadas para a implantação da cultura da soja, para o milho safrinha foi realizado apenas a adubação nitrogenada e foliar, as quantidades e fontes estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Adubação Sistêmica das safras 2018/2019 até 2021/2022;

		Nutriente Fornecido				
Ano agrícola	Fonte/Quantidade	P	K	S	MG	Ca
2018/2019	Fonte	2-18-18	2-18-8 + KCl	-	MgO	Calcário Dolomítico
	Quantidade	500	500 + 83	-	259	1.202
2019/2020	Fonte	MAP	KCl	Enxofre Elementar	-	Calcário Dolomítico
	Quantidade	422	198	50	-	1.082
2020/2021	Fonte	9-40-00	KCl	-	-	-
	Quantidade	153	198	-	-	-
2021/2022	Fonte	9-40-00	KCl	-	-	-
	Quantidade	145	179	-	350	-

Legenda: Fontes, quantidades e nutrientes fornecidos pela adubação sistêmica utilizadas nas safras agrícolas de 2018/2019 a 2021/2022.
Fonte: Autores (2025)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas safras de 2017/2018 e 2018/2019, o manejo da fertilidade do solo foi conduzido com aplicações de corretivos e fertilizantes em taxa fixa. A partir de 2019, iniciou-se a aplicação em taxa variável, associada a um maior detalhamento na amostragem de solo, principalmente no primeiro ano, devido à necessidade de identificar com precisão as manchas de variabilidade (Tabela 3). Essa mudança de estratégia proporcionou maior ajuste do manejo às condições específicas do talhão.

Além do manejo da fertilidade, a alocação de cultivares também foi ajustada ao longo do período, buscando identificar materiais com melhor adaptação às condições da área. A Tabela 3 apresenta as cultivares utilizadas, as populações estabelecidas e as épocas de plantio em cada safra. Nota-se que, após a adoção da cultivar Bônus, houve maior estabilidade populacional e adequação ao talhão, refletindo-se em melhores resultados produtivos. O desempenho produtivo da área experimental está apresentado no Figura 2, evidenciando que as alterações no manejo contribuíram para ganhos de produtividade ao longo das safras.

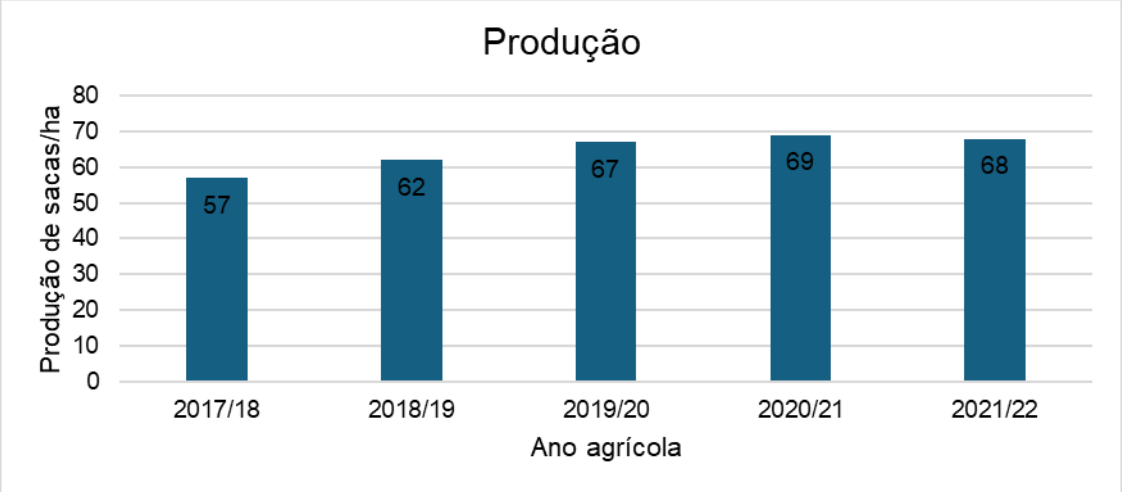
ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 3 - Cultivares, população e época de plantio das 5 safras analisadas.

	Anos agrícolas				
	2017/2018	2018/2019	20219/2020	2020/2021	2021/2022
Cultivar	Soytec 797	Soytec 797	Bônus	Bônus	Bônus
População	400mil/ha	400mil/ha	300 mil/ha	278 mil/há	278 mil/ha
Data de plantio	23/10	21/10	15/10	21/10	02/10

Legenda: Cultivares de soja utilizadas, populações estabelecidas e datas de plantio referentes às safras agrícolas de 2017/2018 a 2021/2022.
Fonte: Autores (2025)

Figura 1: Histórico de produção

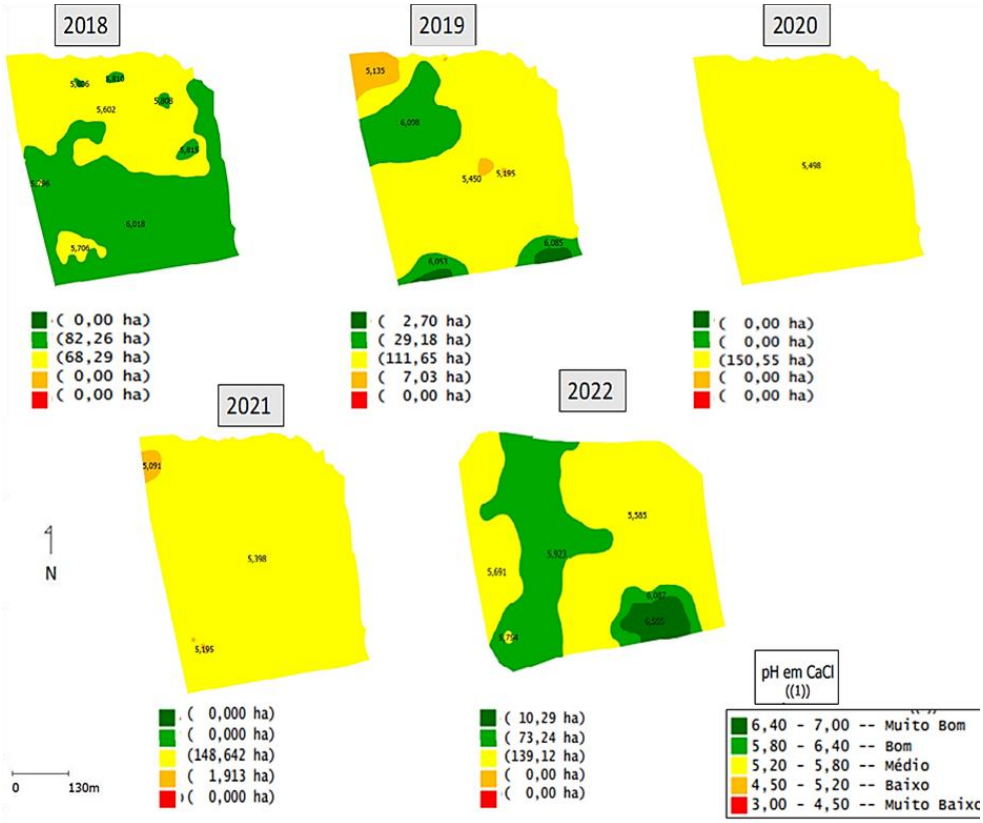


Legenda: Histórico da produtividade da área experimental no período avaliado.
Fonte: Autores (2025)

3.1 Histórico do pH.

Em 2018, perceberam-se níveis elevados de pH, chegando em alguns pontos a ultrapassar 6, enquanto o menor valor encontrado foi de 5,6. O talhão estudado já apresentava pH corrigido e, apesar desses níveis não prejudicarem o crescimento e desenvolvimento das plantas dentro dos 150,55 ha, além da ausência de toxidez por Al^{3+} (Figura 3), foi realizada a calagem com o objetivo de aumentar a disponibilidade de Mg^{2+}, que em relação ao Ca^{2+} estava em menor proporção. As doses utilizadas foram calculadas de forma a não elevar o pH acima de 6 em nenhum ponto da área.

Figura 2 - Histórico do pH entre os anos de 2018 a 2022



Legenda: Mapas de distribuição espacial do pH do solo entre os anos agrícolas de 2018 a 2022.
Fonte: Autores (2025)

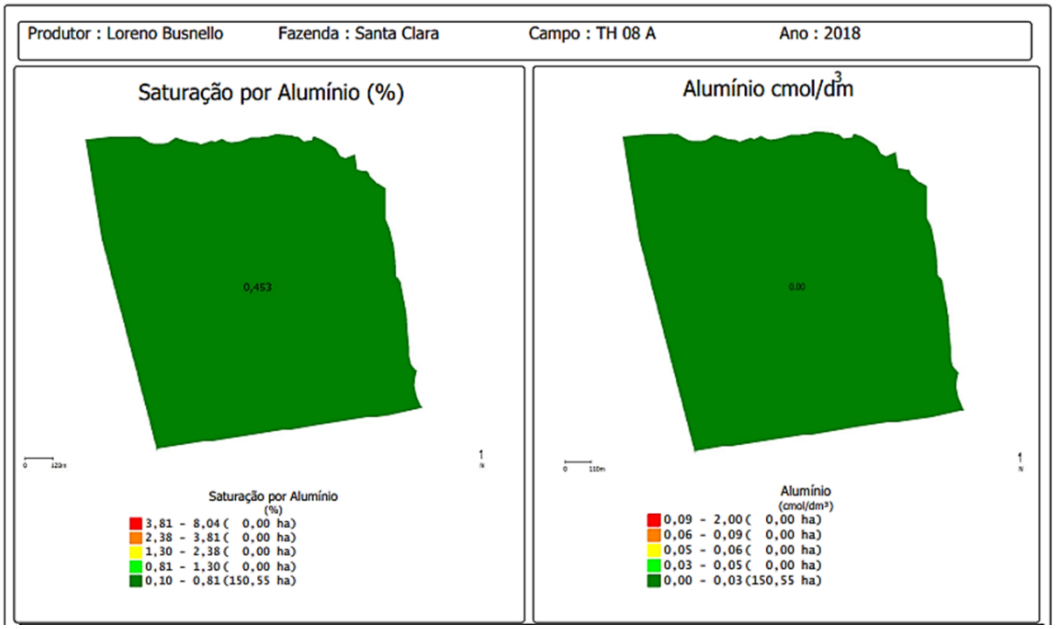
As calagens foram realizadas em pequenas quantidades (Tabela 2), e, embora o objetivo principal não fosse alterar diretamente o pH, observou-se que houve influência na reação do solo. Ao longo dos anos, ocorreu uma tendência de homogeneização dos níveis. Em 2018, por exemplo, 82,6 ha estavam na faixa “Bom” e 68,29 ha na faixa “Médio”. Já em 2019, com a continuidade da adubação em taxa fixa, a variação dos níveis aumentou, resultando em 2,70 ha na faixa “Muito Bom”, 29,18 ha na faixa “Bom”, 111,65 ha na faixa “Médio” e 7,03 ha na faixa “Baixo”.

No primeiro ano de utilização da taxa variável de adubação (2019), a área totalizou-se majoritariamente na faixa “Médio”, refletindo maior uniformidade. Em 2020, essa tendência manteve-se, sendo que apenas 1,91 ha permaneceu na faixa “Baixo”, enquanto todo o restante da área ficou enquadrado na faixa “Médio”. Esse comportamento evidencia que a aplicação localizada contribuiu para reduzir discrepâncias entre os pontos de coleta.

Contudo, após o aumento da área de manejo em 2022, voltaram a aparecer manchas de variação no solo. Em determinados locais, os níveis de pH ultrapassaram novamente 6, enquanto em outros permaneceram em valores intermediários. Nesse ano, 139,12 ha ficaram classificados na faixa “Médio”, 73,24 ha na faixa “Bom” e 10,29 ha na faixa “Muito Bom”, demonstrando que, apesar da melhoria geral da fertilidade, ainda persiste heterogeneidade em função da ampliação da área e da variabilidade natural do solo.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 3 - Níveis de alumínio em cmol/dm^3



Legenda: Mapas de distribuição espacial da saturação por alumínio (%) e dos teores de alumínio
Fonte: Autores (2025)

3.2 Histórico de saturação de base (V%)

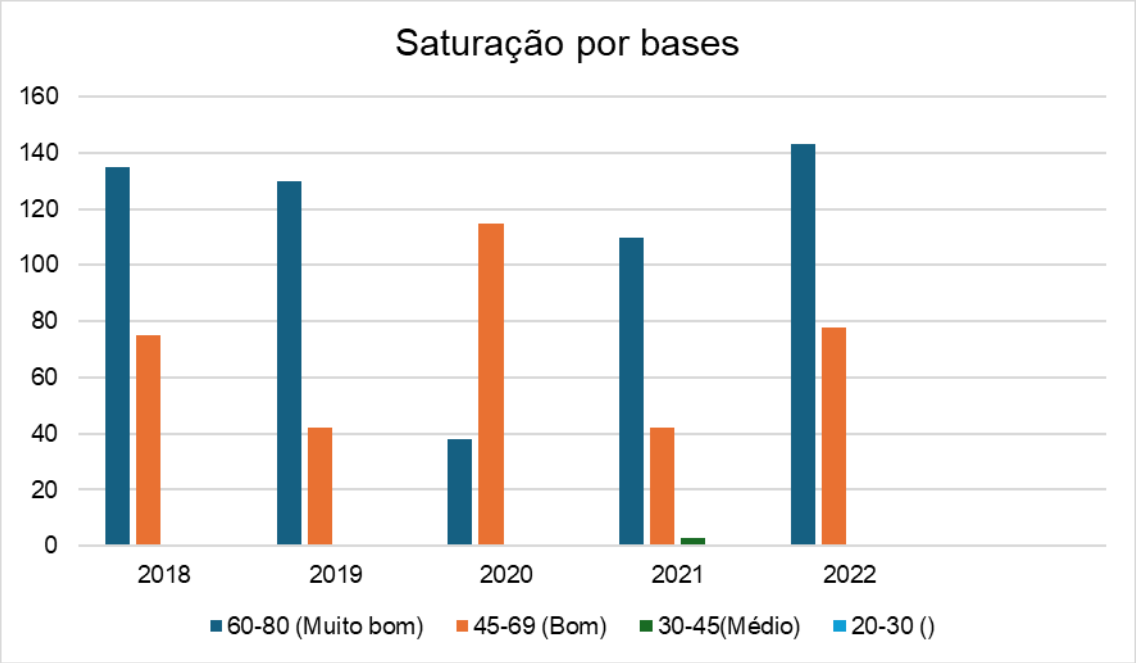
No ano de 2018 o talhão analisado apresentou um V% acima de 60% em 132,73 ha, conforme está demonstrado na Figura 4, algo não desejável para a soja, porém é realizado a calagem na área visando fornecer Mg que se encontra em níveis baixos em relação ao cálcio, tendo a preocupação de não aumentar a saturação de bases para os anos seguintes.

A saturação por bases (V%) apresentou variação ao longo dos anos avaliados (figura 5), refletindo os efeitos das práticas de calagem e do manejo diferenciado da fertilidade do solo. Observa-se que, até 2019, a utilização da adubação em taxa fixa não foi suficiente para reduzir a variabilidade existente, mantendo diferenças entre áreas com maiores e menores níveis de saturação. A partir de 2020, com a adoção da aplicação em taxa variável, verificou-se maior uniformidade nos valores, indicando que o manejo localizado contribuiu para equilibrar a fertilidade do solo.

Do ponto de vista agronômico, valores adequados de saturação por bases são essenciais para o crescimento e desenvolvimento da soja, uma vez que favorecem a disponibilidade de cátions básicos, especialmente Ca^{2+} e Mg^{2+}, e reduzem os efeitos tóxicos do Al^{3+}. Níveis equilibrados de V% também estão diretamente relacionados à eficiência do uso dos fertilizantes, garantindo que os nutrientes adicionados sejam melhor aproveitados pelas plantas. Assim, a melhoria observada na distribuição da saturação por bases ao longo do período analisado representa um avanço no manejo da área, com potencial para elevar a produtividade e a sustentabilidade do sistema de produção.

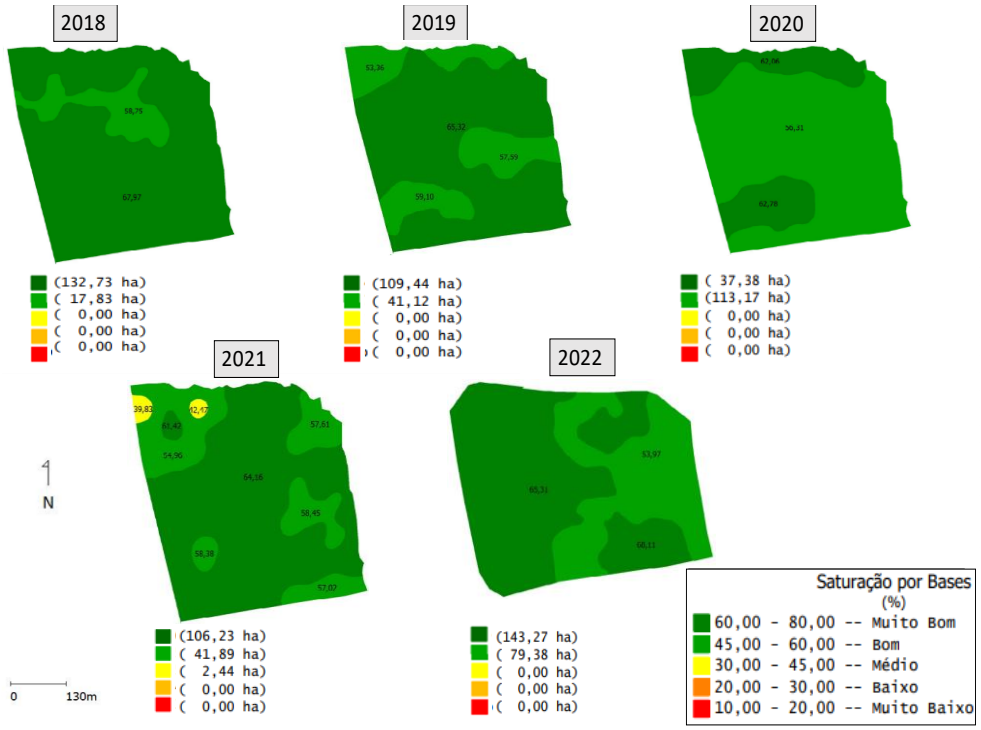
ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 4: Saturação por bases entre os anos 2018 a 2022



Legenda: Variação da saturação por bases (V%) do solo entre 2018 e 2022, indicando a evolução da fertilidade ao longo das safras agrícolas.
Fonte: Autores (2025)

Figura 5 - Histórico de saturação de bases em 2018 a 2022



Legenda: Evolução da saturação por bases (V%) do solo entre 2018 e 2022, destacando a variação temporal da fertilidade.
Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

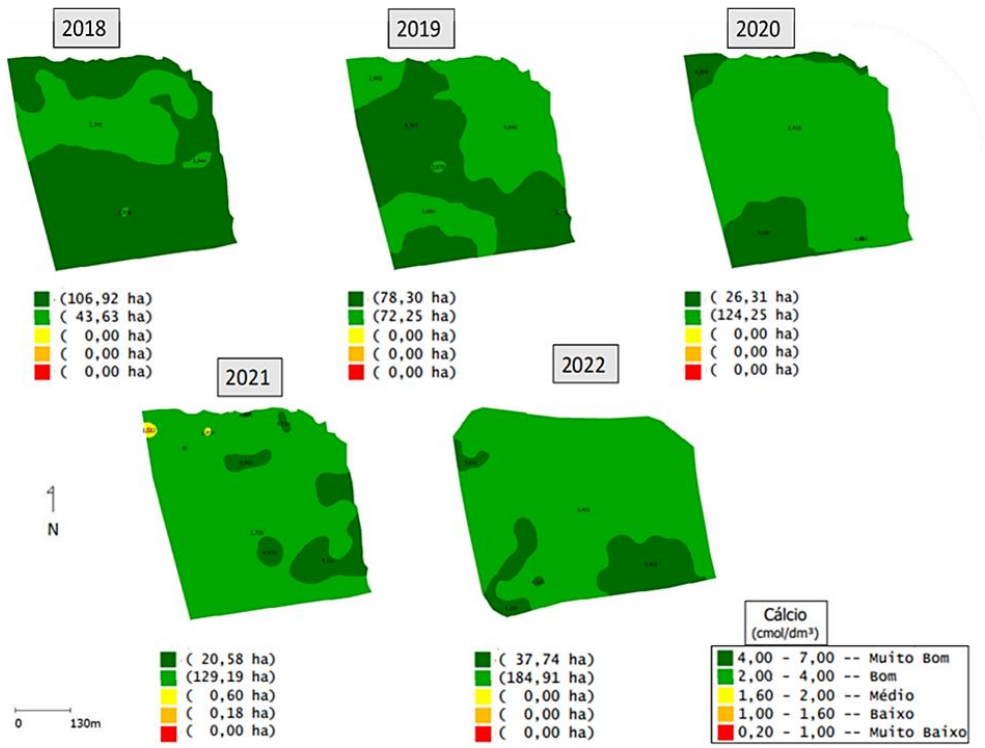
A reação do calcário no solo é gradual e depende do seu poder de neutralização (PN) e disponibilidade de água no solo, tendo os seus efeitos totais no solo em torno de um ano a um ano e meio (CAMARGOS, 2005). Conforme a Tabela 2, foram realizados os procedimentos de calagem nos anos de 2019 em taxa fixa e 2020 em taxa variável, portando a ação total das duas aplicações será observada em 2022, onde irá ter reagido à totalidade do calcário no solo. A Figura 3 mostra o ano de 2022 a maior porcentagem de V% entre os anos analisados, chegando a 68,11%, tendo 143,27ha entre 65 e 68%, o restante da área ficou entre 53% de saturação, a elevação do V% corrobora com CAMARGOS, 2005.

3.3 Histórico de cálcio

Historicamente o talhão estudado recebeu altas quantidades de calagem, todas elas utilizando o calcário calcítico até o ano de 2018. Calcários calcíticos apresentam de 1% a 5% de MgO e de 45% a 55% de CaO" (PRIMAVESI et al., 2012), visualizado o nível elevado de cálcio, comparado aos outros nutrientes, na figura 6.

Percebe-se na Figura 6 a diminuição do cálcio da faixa de Muito Bom (4-7 Cmol/dm³) para a faixa de Bom (2-4 Cmol/dm³) em sua maioria da área, onde se tinha em 2018, 106,92 ha e em 2021, antes do acréscimo de área, 129,19 ha, em 2022 continuou a tendência de se manter a maior parte da área na faixa de 2-4 Cmol/dm³, tendo 184,91 ha, de 222,65 ha.

Figura 6 - Histórico de cálcio entre 2018 a 2022



Legenda: Histórico dos teores de cálcio (cmol/dm³) no solo no período de 2018 a 2022.
Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

Tendo em vista a época de coleta de solo, depois da extração da safrinha de milho e safra de soja, onde teríamos a menor quantidade de nutrientes no solo, os teores de Cálcio ainda se mantinha na faixa Muito Boa, o que não justifica, em caso de necessidade de calagem, a utilização de calcário calcítico, o que agravaria a disparidade entre a quantidade de Ca, Mg e K no solo, podendo chegar a níveis prejudiciais ao crescimento e desenvolvimento de plantas.

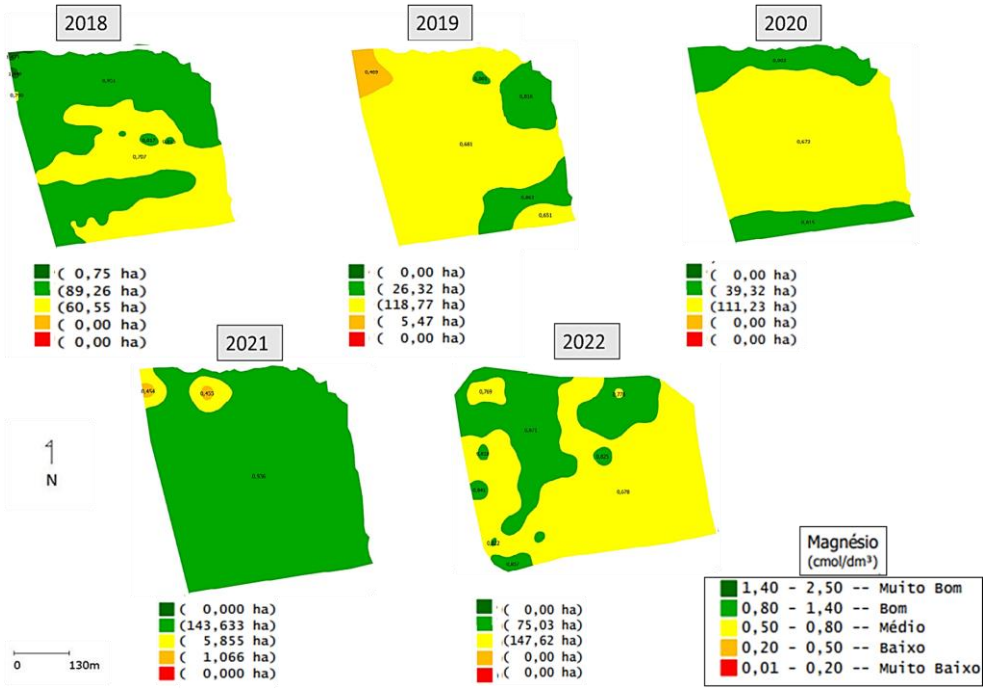
É demonstrado na Figura 6 a homogeneização dos teores de cálcio no talhão, onde a partir de 2019, que começa o processo de aplicação em taxa variável de corretivos agrícolas, tinha-se em, 78,30 ha, na faixa Muito Bom e 72,25 ha na faixa Bom, distribuído em manchas, no ano seguinte 26,31 ha se encontraram na faixa muito bom e 124,25 na faixa Bom.

3.4 Histórico do magnésio

A figura 7 mostra os níveis de Mg em Cmol/dm³ em cada ano, percebesse uma elevação lenta desse nutriente para as faixas de bom e Muito bom, mesmo com a utilização de calcário dolomítico e óxido de Mg, todavia, tendo em vista a alta quantidade de Ca, é esperado uma vez que ambos os cátions possuem a mesma valência e o Mg necessita que a Ca adsorvido as cargas negativas se desprendam e liberem espaço.

Com relação à aplicação dos corretivos em taxa variável, observamos o mesmo processo ocorrido na Figura 7, onde as manchas vão sendo corrigidas e os níveis de Mg se tornam cada vez mais homogêneo no talhão, percebe-se em 2018, 60,65 ha na faixa médio e 89,26 ha na faixa bom, já no ano de 2021, antes do aumento da área do talhão, 143,63 ha encontra-se na faixa bom e 5,85 ha na faixa médio.

Figura 7 - Histórico de magnésio entre 2018 a 2022



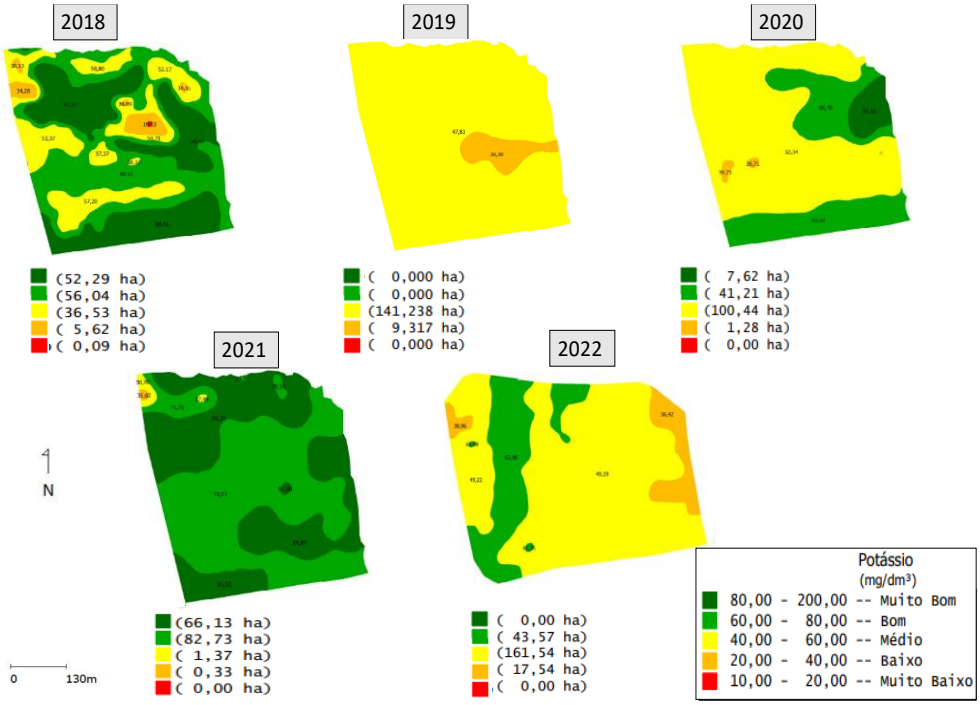
Legenda: Histórico dos teores de magnésio (cmol/dm³) no solo entre 2018 e 2022.
Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

3.5 Histórico de potássio

A Figura 8 relata a base que se manteve mais heterogênea, mesmo com a aplicação em taxa variável, o potássio se mostrou em manchas no talhão, demostrando a velocidade onde o K se move pelo solo, todavia a redução das disparidades de níveis de K foi nítida.

Figura 8 - Histórico de potássio entre 2018 a 2022



Legenda: Histórico dos teores de potássio (cmol/dm³) no solo no período de 2018 a 2022.
Fonte: Autores (2025)

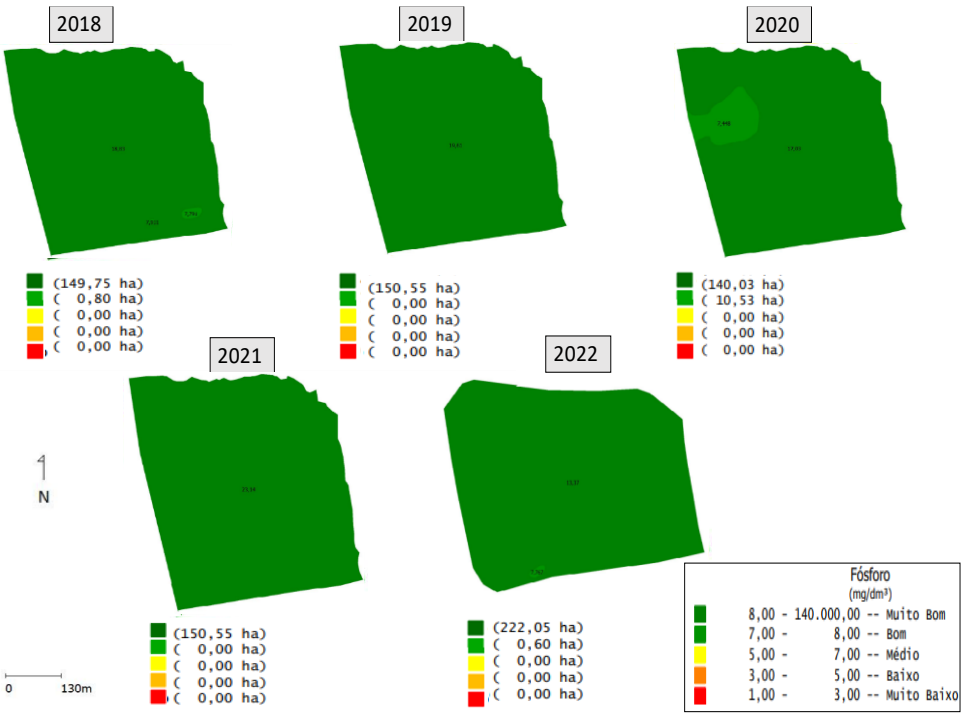
Quando aplicado em taxa variável, onde em 2018 tínhamos 52,29 ha na faixa Muito Bom, 56,04 ha na faixa Bom e 36,53 ha na faixa Médio, no ano seguinte apresentou apenas 9,317 ha na faixa Baixo e o restante na faixa Médio, já em 2020 com o primeiro reflexo da taxa variável, 100,44 ha ficaram na faixa Médio e 41,21 ha na faixa Bom, no segundo ano de taxa variável, tem-se 66,13 ha na faixa Muito Bom e 82,73 na faixa Bom, porém apresentando bastante manchas no talhão e por fim em 2022, já com acréscimo da área, 43,57 ha ficaram na faixa Bom, 161,54 ha ficaram na faixa Médio e 17,54 na faixa Baixo.

3.6 Histórico de fósforo

É visível a manutenção em níveis altos de P na Figura 9, onde mesmo em adubação em taxa fixa e em taxa variável, mantiveram-se teores de fósforo na totalidade da área, ocorreu também a diminuição de doses do fertilizante durante os anos e mantiveram-se os níveis elevados.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 9- Histórico de fósforo entre 2018 a 2022



Legenda: Histórico dos teores de fósforo disponível (mg/dm³) no solo entre 2018 e 2022.
Fonte: Autores (2025)

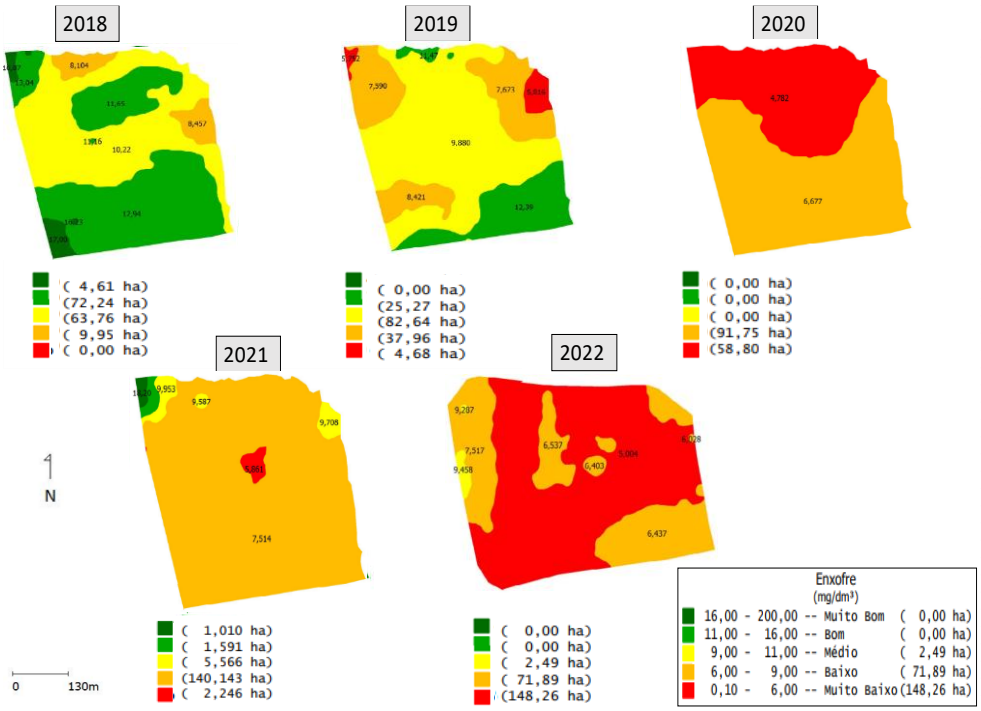
3.7 Histórico de enxofre

A análise da disponibilidade de sulfato para as plantas deve ser feita a partir das camadas subsuperficiais, devido aos fatores citados nos parágrafos acima, assim sendo importante a realização de amostragens em camadas mais profundas.

A Figura 10 mostra a concentração de enxofre na camada de 0,20 m do solo, no ano de 2018 apesenta 4,61ha na faixa Muito Bom, 72,24 ha na faixa Bom, 63,76 na faia Médio e apenas 9 ha na faixa Baixo, nos anos seguintes, a concentração de enxofre nas faixas Muito Bom, Bom e Médio decresce e em 2020 já se apresenta 91,75 ha na faixa Baixo e 58,80 na faixa Muito Baixo, os anos seguintes seguem a mesma tendência.

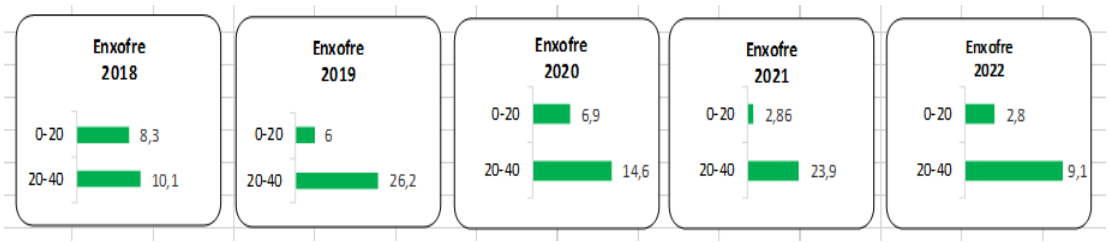
Foi relatado que anterior a safra de 2017/18 houve aplicação de 1T/ha de gesso agrícola, justificando os teores elevados no mapa de enxofre de 2018, da mesma forma ilustra a rápida lixiviação do Enxofre nos anos seguintes (Figura 11).

Figura 10 - Histórico de enxofre entre 2018 a 2022



Legenda: Histórico da concentração de enxofre disponível (mg/dm³) no solo entre 2018 e 2022.
Fonte: Autores (2025)

Figura 11 - Histórico de enxofre nas camadas 0-20cm e 20-40 entre os anos de 2018 à 2022



Legenda: Comparação da concentração de enxofre (mg/dm³) nas camadas de 0–20 cm e 20–40 cm do solo entre os anos de 2018 e 2022.
Fonte: Autores (2025)

4 CONCLUSÃO

O fósforo e o cálcio foram os nutrientes que apresentaram maior homogeneização de níveis da aplicação em taxa variável.

O magnésio foi trabalhado com maior ênfase nas adubações, utilizando de duas fontes para sua correção e apresentou maior variação de níveis comparado ao fósforo e cálcio.

ISBN 978-65-990392-6-3

O Potássio apresentou a maior heterogeneidade na área, em todos os anos analisados, em comparativo aos demais nutrientes.

O enxofre se concentrou na camada de 20-40 cm do solo, apresentando níveis baixos na camada de 0-20 cm do solo.

REFERÊNCIAS

CAMARGO, S. L. **Acidez e calagem (Reação do solo)**. Cuiabá, 2005. 26 p. Disponível em: https://www.ufjf.br/baccan/files/2019/04/Apostila_Capitulo_2_Acidez_Calagem.pdf. Acesso em: 14 ago. 2022.

COMIG, E. **Capacidade de suporte natural: caracterização da região do Médio Vale do Araguaia, Estado do Mato Grosso**. 2019. 137 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2019. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/182111/gomig_eg_dr_rcla.pdf?sequence=3. Acesso em: 9 jun. 2022.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R. F. et al. (org.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 551-594.

FLORES, R. A.; CUNHA, P. P. *Prática de manejo do solo para adequada nutrição de plantas no Cerrado*. Goiânia: UFG, 2016. 634 p.

JUNIOR, A. et al. **Agricultura de precisão**: um novo olhar: zonas de manejo: teoria e prática. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. cap. 6, p. 60-64. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/83701/1/Proci-11.00246.PDF. Acesso em: 16 jun. 2022.

LAMPARELLI, R. A. C. **Agricultura de precisão**. Brasília: Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2016. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_72_711200516719.html#. Acesso em: 16 maio 2022.

PRIMAVESI, A. et al. **Características de corretivos agrícolas**. Brasília: Embrapa, 2012. 28 p. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/42323/1/Doc37ACP2004.pdf. Acesso em: 30 jul. 2022.

SANTI, L. **Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. 1. ed. rev. Santa Maria: CEPOL, 2016. 309 p. ISBN 978-85-92745-02-8.

SOUSA, D.; LOBATO, E. **Correção do solo e adubação da cultura da soja**. Planaltina: Embrapa, 1996. 30 p. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/551684/1/cirtec33.pdf. Acesso em: 7 ago. 2022.

CAPÍTULO 23

CICLAGEM DE NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS INFLUENCIADA PELA PARTIÇÃO DA FERTILIZAÇÃO NITROGENADA ENTRE A CULTURA DE COBERTURA E O TRIGO

NUTRIENT CYCLING AND GRAIN PRODUCTIVITY INFLUENCED BY THE PARTITION OF NITROGEN FERTILIZATION BETWEEN COVER CROP AND WHEAT

Mateus Junior Rodrigues Sangiovo[1]; Claudir José Basso[1]; Telmo Jorge Carneiro Amado[2]; Ana Paula Maccari[3]; Lucindo Somavilla[1]; Mariana Rockenbach de Ávila[4]; Rodrigo Buffon[5]; Lúcio De Paula Amaral[6]

[1] Universidade Federal de Santa Maria, *campus* Frederico Westphalen, 98400-000, Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brasil, sangiovo.ufsm@gmail.com, claudirbasso@gmail.com, lucindosomavilla@hotmail.com
[2] Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Solos - Centro de Ciências Rurais, 97105-000, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, ProfTelmoAmado@gmail.com
[3] Pesquisa e Desenvolvimento AG Croppers, Doutora em Ciência do Solo, 38400-001, Uberaba, Minas Gerais, Brasil, ana.maccari@agcroppers.com
[4] Universidade Federal do Pampa, *campus* Dom Pedrito, 96450-000, Dom Pedrito, Rio Grande do Sul, Brasil, marianaavila@unipampa.edu.br
[5] Engenheiro agrônomo, CEO – SPD Soil Diagnostic, 75800-001, Jataí, Goiás, Brasil, Rodrigo.Buffon@spdsoil.com
[6] Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Engenharia Rural - Centro de Ciências Rurais. 97105-000, Santa Maria – RS, Brasil, pamaralengflorestal@gmail.com

RESUMO

O nitrogênio é considerado um dos nutrientes essenciais para o aumento da fotossíntese e consequentemente aumento de produtividade das lavouras. O objetivo do estudo foi combinar a cultura de cobertura (nabo pé de pato), junto a diferentes estratégias de aporte de nitrogênio no sistema de produção. A pesquisa iniciou em abril de 2024, na área experimental da Universidade Federal de Santa Maria, *campus* Frederico Westphalen – RS. O experimento foi um fatorial, em blocos ao acaso, com 4 repetições. Os tratamentos foram: T1 controle (0% de N), T2 (100% do N aplicado na cultura do nabo), T3 (50% do N aplicado na cultura do nabo + 50% do N aplicado na cultura do trigo) e T4 (100% do N aplicado na cultura do trigo). Nossos achados indicaram maior produção de matéria seca, aumentou na concentração de nutrientes ciclados pela cultura de cobertura na ordem K > N > P aos tratamentos (T3 e T2). A produtividade do trigo acompanhou os resultados expressos pela cultura de cobertura, com aumento médio de 26% no tratamento T3 em relação ao tratamento T4 (manejo adotado em grande parte das áreas de trigo do estado).

Palavras-chave: Nitrogênio. *Raphanus sativus* L. *Triticum aestivum*.

ABSTRACT

Nitrogen is considered one of the essential nutrients for increasing photosynthesis and, consequently, increasing crop productivity. The objective of this study was to combine a cover crop (duckfoot turnip) with different nitrogen supply strategies in the production system. The research began in April 2024, at the experimental area of the Federal University of Santa Maria, Frederico Westphalen *campus*, Rio Grande do Sul. The experiment was a factorial, randomized block design, with four replicates. The treatments were: T1 control (0% N), T2 (100% N applied to the turnip crop), T3 (50% N applied to the turnip crop + 50% N applied to the wheat crop), and T4 (100% N applied to the wheat crop). Our findings indicated greater dry matter production and increased nutrient concentrations cycled by the cover crop in the order K > N > P to the treatments (T3 and T2). Wheat productivity followed the results expressed by the cover crop, with an average increase of 26% in the T3 treatment compared to the T4 treatment (management adopted in a large part of the state's wheat areas).

Keywords: Nitrogen. *Raphanus sativus* L. *Triticum aestivum*.

1 INTRODUÇÃO

A cultura do trigo (*Triticum aestivum*), principal cereal de inverno cultivado no Sul do Brasil, nesta safra corrente (2025) abrange área próxima a 1,198 milhão de hectares no Rio Grande do Sul, representando uma queda de 10% em relação à safra anterior, segundo levantamento realizado pela Emater em 2025. Grande parte desta diminuição de área está atrelado ao risco climático e alto investimento em fertilizantes (LEMAINSKI et al., 2022).

Mais de 90% da biomassa produzida pelas plantas é oriundo dos processos derivados da fotossíntese (MAKINO, A. 2011). Neste sentido, ao redor do mundo muitos cientistas estão dedicando esforços em desenvolver estratégias que beneficiem a fotossíntese pelas plantas mesmo sobre condições ambientais adversas (estresse abiótico), de modo que o impacto no desempenho agronômico seja mitigado (BOSSOLANI et al., 2021, CRUSCIOL et al., 2022). O nitrogênio (N) é um componente essencial da clorofila cuja deficiência impacta negativamente a fotossíntese, embora a eficiência da fertilização nitrogenada, necessária para complementar o fornecimento do solo, em gramíneas como o trigo e milho, é considerada um dos principais desafios da agricultura moderna. Neste contexto, deve-se considerar que se trata de um insumo crítico para aumentar a produtividade de grãos, porém um dos nutrientes mais caros para fornecer via adubação mineral, Schwalbert et al. (2019), e com elevado potencial de impacto ambiental.

Alternativamente ao pousio e mesmo ao cultivo de trigo a utilização de culturas de cobertura durante o período de entressafra tem aumentado, mas ainda se mantém muito inferior a área de soja cultivada no verão (> 6,2 M ha). Entre as diferentes espécies possíveis de serem cultivadas após o cultivo de soja e antecedendo a cultura do trigo, destacam-se o nabo pé de pato, que possui raízes grandes, e o nabo forrageiro japonês Minowase que por possuir raízes mais finas pode alcançar camadas profundas 0,60 a 1,00 m (*Raphanus sativus* L.). O nabo forrageiro por seu ciclo curto possibilita o “plantio no verde”. A espécie demonstra rápido estabelecimento, proporcionando elevada cobertura com proteção do solo em período crítico para erosão (maio e junho), alta ciclagem de nutrientes em especial N (nitrogênio), S (enxofre), K (potássio) e P (fósforo), enquanto raízes de maior diâmetro

e profundidade auxiliam no aumento da taxa de infiltração de água e formação de bioporos contínuos que ligam a camada superficial ao subsolo (GROVE et al., 2007, CHEN, G. & WEIL, R. 2010, LAWLEY et al., 2011, GRUVER et al., 2014). Com isto, existe uma diminuição da resistência a penetração do solo e melhoria das condições físicas do solo. Como cuidado, ao utilizar o nabo forrageiro deve-se manejar antes da formação de sementes e a possibilidade de multiplicação de mofo branco deve ser avaliada.

Buscar alternativas que promovam aumento no aporte de resíduos ao solo pelas culturas de cobertura, incrementar a quantidade de nutrientes ciclados e consequentemente melhoria do sistema plantio direto é uma estratégia para dotar de sustentabilidade as áreas agrícolas (AMADO & ELTZ, 2003, SANTI et al., 2003, MOMESSO et al., 2022, SANGIOVO et al., 2024, SOUZA et al., 2024).

Neste sentido, a hipótese deste trabalho é que se pode incrementar a eficiência do suprimento de nitrogênio ao trigo pela utilização do nabo como cultura de cobertura e, consequentemente, aumentar a produtividade da cultura do trigo. O objetivo do estudo foi combinar a cultura de cobertura (nabo pé de pato), junto a diferentes estratégias de aporte de nitrogênio no sistema de produção de trigo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Características do local de estudo

O estudo iniciou em abril de 2024 e foi desenvolvido na área experimental do Departamento de Ciências Agronômicas e Ambientais da Universidade Federal de Santa Maria, *campus* Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brasil, coordenadas 27° 21′ 32″ S, 53° 23′ 38″ O, altitude média de 566 m.

O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico no sistema brasileiro e Hapludox no sistema americano, profundo e bem drenado (SANTOS et al., 2018). As características químicas iniciais do solo são apresentadas na (Tabela 1) e foram determinadas pela metodologia proposta por (TEDESCO et al., 1995).

Tabela 1 - Média das características microbiológicas, atividade enzimática (Beta-Glicosidase e Arilsulfatase) e matéria orgânica do solo (MOS) antes da instalação do experimento de pesquisa. Frederico Westphalen – RS, 2024.

Estatísticas	Beta-Glicosidase	Arilsulfatase	MOS (%)
	mg p-nitrofenol kg solo/hora		
Média	142,6	143,6	4,64
CV (%)	9,32	3,05	4,54

Fonte: Autores (2025)

2.2 Delineamento experimental e práticas de manejo

O delineamento experimental foi um fatorial em blocos ao acaso, com parcelas subdivididas com 4 repetições. Os tratamentos estudados foram estratégias de fertilização nitrogenada: T1 controle (0% de N), T2 (100% do N aplicado na cultura do

ISBN 978-65-990392-6-3

nabo), T3 (50% do N aplicado na cultura do nabo + 50% do N aplicado na cultura do trigo) e T4 (100% do N aplicado na cultura do trigo). A dose de nitrogênio adicionada foi 100 kg ha^{-1}, correspondendo a 222,2 kg ha^{-1} de ureia (concentração de 45% N). A cultura de cobertura foi o nabo pé de pato (*Raphanus sativus* L.) sendo a semeadura realizada em 10/04/2024, após a colheita da soja.

A cultura do nabo foi semeada na densidade de 35 kg ha^{-1}, no espaçamento de 0,17 cm. Os tratamentos T2 e T3 onde o N foi aplicado de forma antecipada durante o desenvolvimento da cultura de cobertura sendo realizada 47 dias após a semeadura do nabo forrageiro, em pleno desenvolvimento vegetativo. Os tratamentos onde o N foi aplicado na cultura do trigo, foram realizados em dois momentos, inicio do perfilhamento e início da elongação da cultura.

O manejo da cultura de cobertura foi realizado aos 75 dias de ciclo, efetuada dessecação com herbicida hormonal (ácido 2,4-diclorofenoxiacético) e posterior semeadura do trigo sobre a cultura de cobertura ainda verde no espaçamento de 0,17 cm sobre a cultura de cobertura ainda verde. A cultivar de trigo utilizada foi TBIO motriz, numa densidade de 130 kg ha^{-1}, adubação com superfosfato triplo na base de 120 kg ha^{-1} e 150 kg ha^{-1} de cloreto de potássio a lanço. Quanto ao manejo fitossanitário este foi realizado seguindo as recomendações técnicas da cultura de forma homogênea em todos os tratamentos, conforme as indicações técnicas da cultura.

2.3 Produção de matéria seca, ciclagem de nutrientes e produtividade de trigo

A produção de matéria seca da cultura de cobertura foi avaliada aos 75 dias e para a cultura do trigo em pleno florescimento utilizando uma área útil de 0,250 m^2 com três repetições por parcela. As amostras coletadas foram secas em estufa com circulação de ar à 65 °C até atingir peso constante, em seguida foram pesadas, e posteriormente moídas para análise de tecido.

Para quantificação dos nutrientes contidos na matéria seca da cultura de cobertura (nitrogênio, fósforo e potássio) foi realizado a digestão ácida de tecidos com a utilização de H_2O_2 e H_2SO_4 com extração dos nutrientes, conforme proposto pela metodologia (Tedesco, 1995). A produtividade da cultura do trigo foi avaliada manualmente em novembro de 2024, sobre uma área útil de 3,4 m^2 com três repetições. A umidade dos grãos foi corrigida para 13%.

2.4 Análise estatística

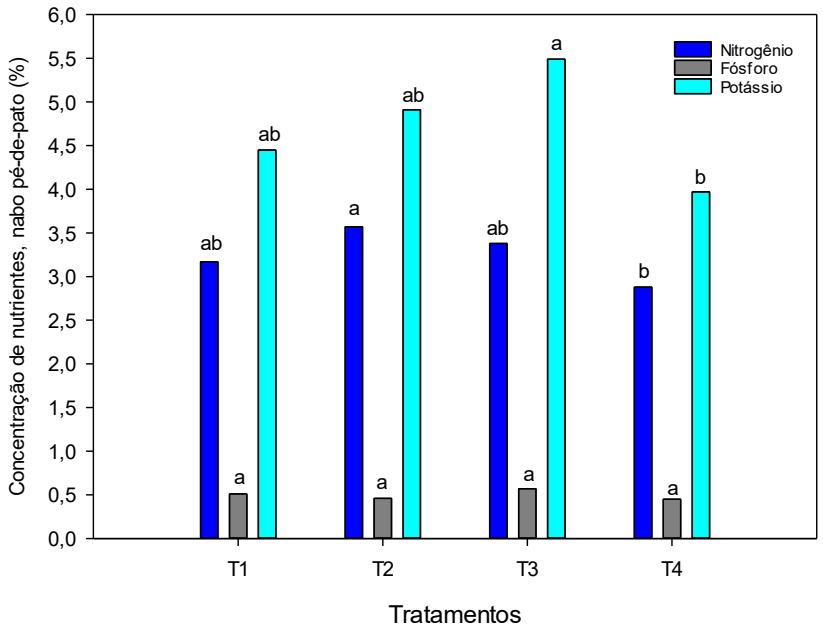
Os resultados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste Tukey ($p < 0.05\%$), através do programa estatístico Sisvar, versão 5.3 (FERREIRA, 2014).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A concentração de nutrientes presente na matéria seca da cultura de cobertura foi significativamente diferente entre os tratamentos para os nutrientes N e K, não diferindo para o fósforo (Figura 1). Para o N, conforme esperado, a maior concentração foi identificada no tratamento (T2) 100% do N aportado na cultura de cobertura (3,57% de N). Está maior concentração de N representou aumentos de até 5,62%, 12,61% e 23,95% em comparação aos tratamentos T3, T1 e T4. Trabalhos

conduzidos em outras regiões aportando diferentes doses de N na cultura do nabo (*Brassica rapa* L.), reportaram resposta positiva sobre o desenvolvimento da cultura de cobertura à medida que se aumentou a quantidade de N aportado (SADIA et al., 2013). Os autores reforçam que a resposta das brássicas ao fertilizante nitrogenado depende da quantidade de N residual e mineralizado no solo, que é influenciada pelo histórico de cultivo anterior e o teor de MOS (KEOGH et al., 2012). Neste sentido, destaca-se que a cultura anterior foi a soja e que parte do N dos resíduos da soja possam estar sendo ciclados pelo nabo forrageiro, reduzindo as perdas do nutriente por lixiviação. Este fato é reforçado pela quase ausência de diferença estatística da concentração de N entre os tratamentos (T1 e T4) sem aporte de fertilizante na cultura de cobertura com os tratamentos (T2 e T3) com aporte de fertilizante. Exceção a diferença na concentração de N do tratamento T2 em relação ao T4.

Figura 1 – Concentração de nutrientes (%), presentes na matéria seca da cultura de cobertura (nabo pé de pato). Frederico Westphalen – RS, 2024.



Tratamentos: T1 controle (0% de N), T2 (100% do N aplicado na cultura do nabo), T3 (50% do N aplicado na cultura do nabo + 50% do N aplicado na cultura do trigo) e T4 (100% do N aplicado na cultura do trigo). Letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa pelo teste Tukey a ($p < 0.05\%$).
Fonte: Autores (2025).

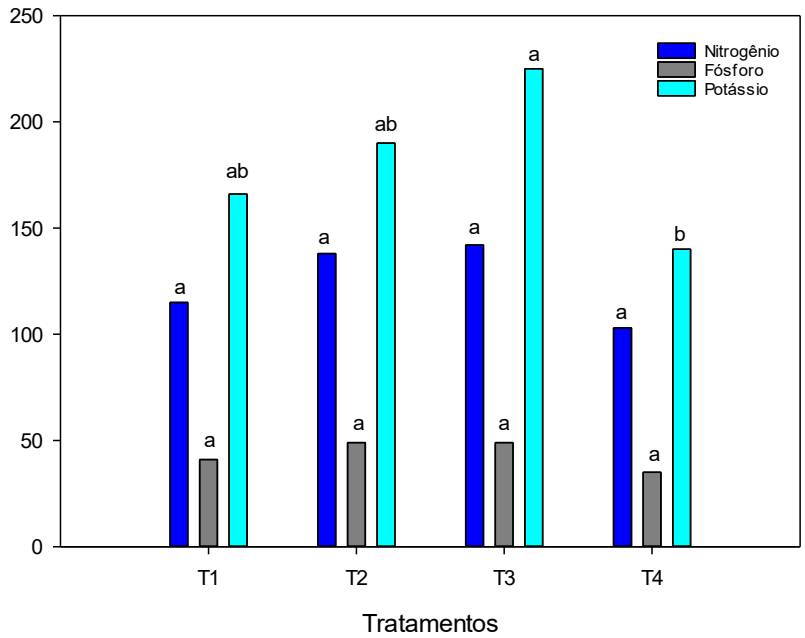
Já para o K (Figura 1), a maior concentração foi encontrada no tratamento (T3), 50% do N aplicado na cultura de cobertura. Está maior concentração foi de 11,81%, 23,37% e 38,28% superior em relação aos tratamentos T2, T1 e T4. A maioria dos tratamentos não apresentaram diferença estatística quanto a concentração de K, exceto o T3 que teve maior concentração que o T4.

ISBN 978-65-990392-6-3

Em solos com baixo teor de argila, o aumento da concentração de K na parte aérea da cultura do nabo foi dependente de quantidades de K fornecida via adubação complementar, muito em função da baixa quantidade de K presente em solos arenosos (NETO et al., 2010). Para a concentração de P não foi identificado diferença significativa entre os tratamentos.

Na Figura 2 é apresentada a quantidade de nutrientes presentes na matéria seca da cultura de cobertura. Os resultados indicaram pequena diferença significativa entre os tratamentos. Apenas a quantidade de K, com maior valor (224,5 kg ha^{-1}) ao tratamento T3 foi superior ao T4 (130 kg ha), representando um acréscimo de 70% em relação ao T4. O tratamento T3 teve aumento na quantidade de K no nabo equivalente de 34,1, 57,6 e 84,1 kg ha^{-1} em relação aos tratamentos T2, T1 e T4. Este resultado sugere que é possível melhorar a eficiência da ciclagem de K pela partição do N fertilizante entre o nabo e a cultura do trigo.

Figura 2 – Quantidade de nutrientes (kg ha^{-1}), presentes na matéria seca da cultura de cobertura (nabo pé de pato). Frederico Westphalen – RS, 2024.



Tratamentos: T1 controle (0% de N), T2 (100% do N aplicado na cultura do nabo), T3 (50% do N aplicado na cultura do nabo + 50% do N aplicado na cultura do trigo) e T4 (100% do N aplicado na cultura do trigo). Letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa pelo teste Tukey a (p < 0.05%).
Fonte: Autores (2025).

Quanto a quantidade de N e P ciclados pelo nabo, não foi identificado diferença significativa entre os tratamentos (Figura 2). Porém, numericamente o tratamento (T3),

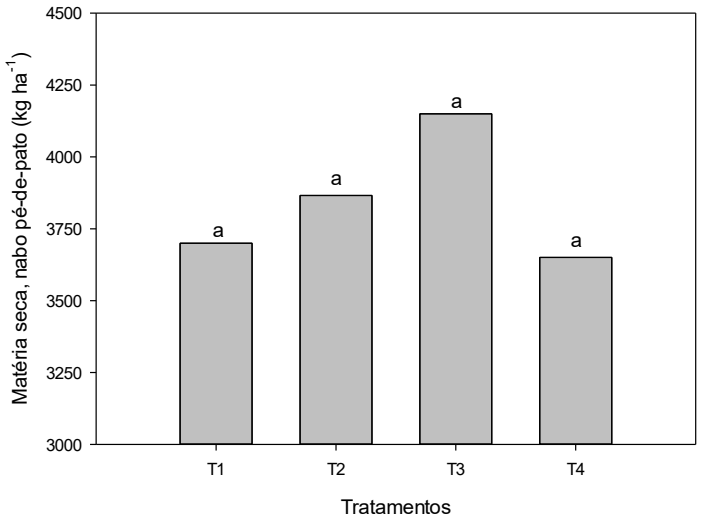
apresentou os maiores valores médios, 142,9 kg ha^{-1} para N e 49,2 kg ha^{-1} de P. Já os menores valores médios foram de 103,1 kg ha^{-1} de N e 35 kg ha^{-1} de P, observados no tratamento T4. Estando alinhados com a maior ciclagem de K, apresentada anteriormente pela partição da fertilização entre o nabo e o trigo.

Estudando o aporte de N na cultura de cobertura aveia preta Santi et al. (2003), encontraram relação positiva sobre o acumulo e consequentemente maior quantidade de K presente na fitomassa da aveia, com incremento de 88% quando realizado o aporte de 240 kg ha^{-1} de ureia em relação a testemunha. Esse tipo de interação N x K é da maior importância para agricultores que pretendem conseguir não somente altas produções, mas também, obter máxima eficiência no uso dos fertilizantes (MENGEL & KIRKBY, 2001). Esse aspecto assume relevância ainda maior em sistemas de agricultura intensiva e para culturas de ciclo curto, como do nabo (NETO et al., 2010).

Quanto ao fósforo em nosso estudo não houve diferença significativa, porém foi observado que a quantidade de P aumentou em 40,5% no tratamento onde se aportou 50% do N na cultura do nabo (T3) em relação ao tratamento sem aporte de N na cultura do nabo (T4). Este resultado assemelha-se ao encontrado por Santi et al. (2003), estudando o comportamento em gramínea. Na maior dose de N aplicada (240 kg ha^{-1} de ureia), verificou-se um incremento de 70 % no acúmulo de P, quando comparado ao tratamento sem adubação nitrogenada na cultura de cobertura da aveia.

A produção de matéria seca da cultura do nabo variou de 4150 kg ha^{-1} (T3) a 3700 kg ha^{-1} (T4) (Figura 3), não diferindo estatisticamente entre os tratamentos. Porém, numericamente o maior valor observado no tratamento T3 representou aumentos de 7,3, 12,2 e 13,7% no comparativo aos tratamentos T2, T1 e T4. Quando aportado N fertilizante na cultura de cobertura (T3), houve um incremento médio de 333 kg ha^{-1} de matéria seca em comparação aos tratamentos sem adição de N (T1 e T4). Como discutido por outros autores, o aporte de N na cultura do nabo possibilita maior produção de folhas, diâmetro de caule, altura de planta, e consequentemente, maior estímulo à fotossíntese (NETO et al., 2010, NAWAZ et al., 2020).

Figura 3 – Produção de matéria seca da cultura de cobertura (nabo forrageiro pé de pato) submetido diferentes estratégias de fertilização nitrogenada no trigo. Frederico Westphalen – RS, 2024.

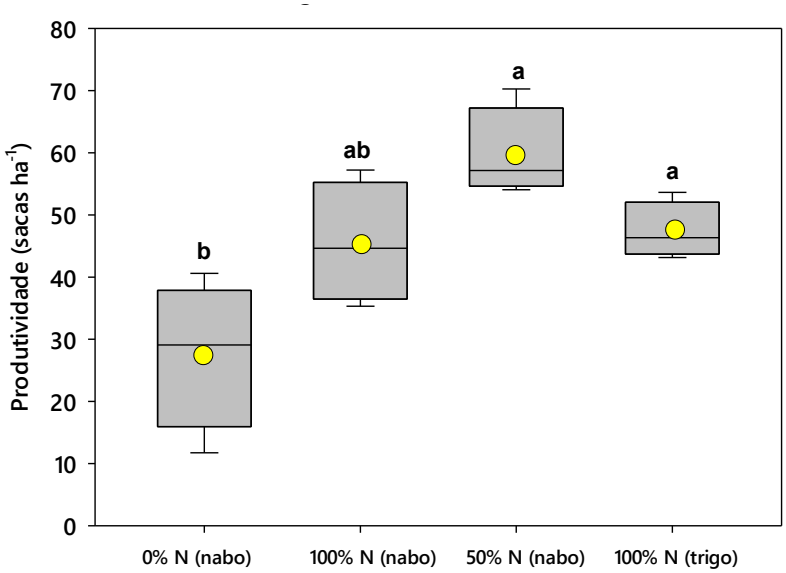


Tratamentos: T1 controle (0% de N), T2 (100% do N aplicado na cultura do nabo), T3 (50% do N aplicado na cultura do nabo + 50% do N aplicado na cultura do trigo) e T4 (100% do N aplicado na cultura do trigo). Letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa pelo teste Tukey a ($p < 0.05\%$).
Fonte: Autores (2025).

A ausência de diferença na produção de MS do nabo (Figura 3) e na quantidade de N (Figura 2) e na maioria dos tratamentos (Figura 1) pode ser associada ao elevado teor de MOS na área experimental (4,64%), que segundo a (CQFS-RS/SC, 2016) é classificada em nível médio para alto, sendo um dos principais reservatórios de N ao sistema podendo ser uma importante fonte de fornecimento de N as culturas (WILSON et al., 2006). O incremento de MS do nabo forrageiro com aporte de fertilização nitrogenada tem sido frequentemente reportado em solos com baixo teor de MOS, solos com salinidade, textura mais arenosa e a combinação de adubação potássica junto ao nitrogênio (NETO et al., 2010, SADIA et al., 2013, ALVES, 2016, NAWAZ et al., 2020).

A produtividade de grãos da cultura do trigo (Figura 4), foi influenciada pela estratégia de partição da fertilização nitrogenada entre cultura de cobertura e o trigo. As maiores produtividades foram identificadas no tratamento T3 (59,6 sc ha^{-1}) seguidos do T4 (47,3 sc ha^{-1}) e T2 (45,4 sc ha^{-1}), todas sem diferença estatística, e a menor produtividade no tratamento T1 (27,6 sc ha^{-1}). A diferença entre o T3 e o T1 foi de 116% sugerindo uma elevada resposta de produtividade de trigo a fertilização nitrogenada, especialmente quando foi utilizada a estratégia mais eficiente de aporte de N valida a área experimental como adequada para investigação das melhores estratégias de ciclagem de nutrientes.

Figura 4 – Produtividade de grãos da cultura do trigo influenciada pela partição da fertilização nitrogenada entre a cultura de cobertura e o trigo. Frederico Westphalen – RS, 2024.



Tratamentos: T1 controle (0% de N), T2 (100% do N aplicado na cultura do nabo), T3 (50% do N aplicado na cultura do nabo + 50% do N aplicado na cultura do trigo) e T4 (100% do N aplicado na cultura do trigo). Letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa pelo teste Tukey a ($p < 0.05\%$).

ISBN 978-65-990392-6-3

Fonte: Autores (2025).

O aumento de 12,3 sc ha^{-1} no tratamento T3 para T4 (manejo tradicional na maior parte das áreas cultivadas com trigo no estado), pode ser compreendido pelo aumento na produção de matéria seca do nabo (Figura 3) e na ciclagem de nutrientes em especial de K e N (Figuras 1 e 2). Considerando que o tratamento T1 basicamente representou o aporte do solo, observa-se que cada kg de N fertilizante no T4 promoveu um incremento de 11,8 kg ha^{-1} de trigo, enquanto no tratamento T3 este valor foi de 19,2, representando um aumento na eficiência aparente de N (NAE) (BRAGAGNOLO et al., 2016; CASSMAN et al., 2002 e DOBERMANN 2005) de 62,7%. Considerando que o custo da ureia é de R$ 1.261 e a saca de trigo a R$ 71, a diferença de retorno econômico no T3 em relação ao T4 foi de R$ 873,3. Cada real investido em fertilização nitrogenada resultou num retorno de R$ 22,7, enquanto no T4 foi R$ 14,0. Para além do retorno econômico, destaca-se o impacto ambiental do uso eficiente de N na cultura do trigo, observa-se que a diferença de absorção de N do nabo no tratamento T3 foi 82 kg ha^{-1} superior em relação ao T4 sugerindo que a partição da fertilização de N no nabo (T3) incrementou a biociclagem do nutriente, diminuindo o risco de perdas por lixiviação sem comprometer a produtividade do trigo. A partição da fertilização nitrogenada ainda beneficiou a cultura do nabo especialmente quanto ao enriquecimento de K (Figura 2) e a combinação de diferentes fontes de N (biomassa do nabo e fertilizante mineral) que tendeu a favorecer a produtividade do trigo.

Na literatura não identificamos estudos que relacionam a produtividade de trigo diante a combinação da adubação antecipada de N durante o cultivo de nabo pé de pato como cultura de cobertura. No entanto, estudos visando otimizar o uso de N na cultura do trigo, através de culturas de cobertura e outras fontes alternativas de N, como (cama de aviário), mostrou-se uma forma eficiente de aumentar a produtividade da cultura do trigo (SOARES et al., 2020). Os autores afirmam que nestes sistemas onde se diversificam as fontes de N que abastecem o sistema, as perdas do N podem ser reduzidas e o estado nutricional da cultura pode ser aprimorada, pela liberação mais gradativa de N durante o ciclo (ROGERI et al., 2016).

4 CONCLUSÃO

A partição do nitrogênio do trigo de forma antecipada para a cultura de cobertura em relação ao manejo tradicional de aplicar toda a fertilização na cultura do trigo favoreceu a ciclagem de potássio.

Quanto a eficiência aparente do nitrogênio na cultura do trigo o tratamento com antecipação de 50% da dose para o nabo pé de pato apresentou maior retorno econômico e proporcionou maior ciclagem de potássio. Ainda, com a adubação nitrogenada antecipada observou-se um incremento de 82 kg ha^{-1} de N na biomassa da parte aérea em relação ao manejo tradicional sugerindo maior eficiência do uso do N do solo e da fertilização nitrogenada mineral.

REFERÊNCIAS

ALVES, M. A. **Produção de nabo japonês fertirrigado com nitrogênio na região de Dourados**. 2016. Acesso em: 01 setembro 2025.

ISBN 978-65-990392-6-3

AMADO, T. J. C., & ELTZ, F. L. F. Plantio direto na palha: rumo à sustentabilidade agrícola nos trópicos. **Ciência e Ambiente**, 27, 49-66. 2003. Acesso em: 25 agosto 2025.

BOSSOLANI, J. W. et al. Long-term lime and phosphogypsum amended-soils alleviates the field drought effects on carbon and antioxidative metabolism of maize by improving soil fertility and root growth. **Frontiers in Plant Science**, 12, 650296. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fpls.2021.650296. Acesso em: 25 agosto 2025.

BRAGAGNOLO, J., AMADO, T. J. C., & BORTOLOTTO, R. P. Use efficiency of variable rate of nitrogen prescribed by optical sensor in corn. **Revista Ceres**, 63(1), 103-111. 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0034-737X201663010014. Acesso em: 26 agosto 2025.

CASSMAN, K. G., DOBERMANN, A., & WALTERS, D. T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, 31(2), 132-140. 2002. Disponível em: https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.2.132. Acesso em: 28 agosto 2025.

CHEN, G., & WEIL, R. R. Penetration of cover crop roots through compacted soils. **Plant and Soil**, 331(1), 31-43. 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11104-009-0223-7. Acesso: 27 agosto 2025.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Exploring the synergism between surface liming and nitrogen fertilization in no-till system. **Agronomy Journal**, 114(2), 1415-1430. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1002/agj2.20988. Acesso em: 01 setembro 2025.

CQFS-RS/SC. Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2016. 376p. Acesso em: 02 setembro 2025.

DOBERMANN, A. R. **A nitrogen use efficiency'state of the art paper of the IFA**. Frankfurt, Germany: International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers. 2005. Acesso em: 26 agosto 2025.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e agrotecnologia**, 38, 109-112. 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001. Acesso em: 24 agosto 2025.

GROVE, J. H., WARD, R. C., & WEIL, R. R. **Nutrient stratification in no-till soils**. Leading Edge, 6, 374-381. 2007. Acesso em: 26 agosto 2025.

GRUVER, J. et al. **Radishes**: a new cover crop for organic farming systems. Michigan State University, MI, 1-14. 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/233861668. Acesso em: 28 agosto 2025.

KEOGH, B., MCGRATH, T., & GRANT, J. The effect of sowing date and nitrogen on the dry-matter yield and nitrogen content of forage rape (Brassica napus L.) and stubble turnips (Brassica rapa L.) in Ireland. **Grass and Forage Science**, 67(1), 2-12. 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2011.00815.x. Acesso em: 02 setembro 2025.

LAWLEY, Y. E., WEIL, R. R., & TEASDALE, J. R. Forage radish cover crop suppresses winter annual weeds in fall and before corn planting. **Agronomy Journal**, 103(1), 137-144. 2011. Disponível em: https://doi.org/10.2134/agronj2010.0187. Acesso em: 25 agosto 2025.

LEMAINSKI, J., CONTINI, E., & ARAGÃO, A. **Trigo, o difícil, mas essencial pão nosso de cada dia**. O futuro do arroz de terras altas no Brasil: cultivo de oportunidade, 154. 2022. Acesso em: 26 agosto 2025.

MAKINO, A. Photosynthesis, grain yield, and nitrogen utilization in rice and wheat. **Plant physiology**, 155(1), 125-129. 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1104/pp.110.165076. Acesso em: 27 agosto 2025.

MENGEL, K. & KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 5.ed. Dordrecht: Kluver Academic Publishers, 2001. 849 p. Acesso em: 28 agosto 2025.

MOMESSO, L. et al. Toward more sustainable tropical agriculture with cover crops: Soil microbiome responses to nitrogen management. **Soil and Tillage Research**, 224, 105507. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105507. Acesso em: 27 agosto 2025.

NAWAZ, M. Q. et al. Growth and yield of turnip (*Brassica rapa* L.) in response to different sowing methods and nitrogen levels in salt-affected soils. **Pakistan J. Agric. Res**, 33(1), 126-134. 2020. Disponível em: http://dx.doi.org/10.17582/journal.pjar/2020/33.1.126.134. Acesso em: 25 agosto 2025.

NETO, A. M. C. et al. Produção de matéria seca e estado nutricional do rabanete em função da adubação nitrogenada e potássica. **Nucleus**, 2(2), 16. 2010. DOI: 10.3738/1982.2278-349. Acesso em: 02 setembro 2025.

ROGERI, D. A. et al. Composition of poultry litter in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 40, e0140697. 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20140697. Acesso em: 03 setembro 2025.

SADIA, A. A. et al. Influence of nitrogen on growth and yield of turnip. **Journal of Experimental Biosciences**, 4(2), 39-42. 2013. Disponível em: https://ssrn.com/abstract=3573942. Acesso em: 02 setembro 2025.

SANGIOVO, M. J. R. et al. Improving the quality of the production environment. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 19(3), 1-9. 2024. DOI: 10.5039/agraria.v19i3a3554. Acesso em: 26 agosto 2025.

SANTI, A., AMADO, T. J. C., & ACOSTA, J. A. A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I-Influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27, 1075-1083. 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000600012. Acesso em: 01 setembro 2025.

SANTOS, H.G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. 353p. 2018. Acesso em: 26 agosto 2025.

SCHWALBERT, R. A. et al. Fine-tuning of wheat (*Triticum aestivum*, L.) variable nitrogen rate by combining crop sensing and management zones approaches in southern Brazil. **Precision Agriculture**, 20(1), 56-77. 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11119-018-9581-6. Acesso em: 02 setembro 2025.

SOARES, E. F. et al. POULTRY LITTER AND COVER CROPS INFLUENCE THE AGRONOMIC PERFORMANCE AND GRAIN YIELD OF WHEAT. **Bioscience Journal**, 39. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.14393/BJ-v39n0a2023-68812. Acesso em: 04 setembro 2025.

SOUZA, V. S. et al. Cover crop diversity for sustainable agriculture: Insights from the Cerrado biome. **Soil Use and Management**, 40(1), e13014. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1111/sum.13014. Acesso em: 01 setembro 2025.

TEDESCO, M. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Ufrgs. 1995. Acesso em: 25 agosto 2025.

TEDESCO, M.J. et al. **Análises de Solo, Plantas e Outros Materiais**. 2nd ed.; Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, Brazil, 1995. Acesso em: 25 agosto 2025.

WILSON, D. R. et al. Forecasting fertiliser requirements of forage brassica crops. In **proceedings of the conference-New Zealand grassland association** (Vol. 68, p. 205). 2006. Acesso em: 02 setembro 2025.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 24

DESEMPENHO DA CULTURA DO MILHO EM SUCESSÃO A DIFERENTES ESPÉCIES DE COBERTURA E APLICAÇÃO DE CORRETIVO

Performance of maize cultivation in succession to different cover crop species and lime applications

Vitor Eduardo Schardong[1]; Antônio Luis Santi[1]; Bruno Henrique Rodrigues Sangiovo[1]; André Felipe De Conti[1]; Renan da Rosa[1]; Julio Gustavo Buchholz[1]; Wiliam José Jungens[1]; Amanda Fornari[1]
schardong.vitor@acad.ufsm.br, santi_pratica@yahoo.com, brunosangiovo@hotmail.com, decontiagro@gmail.com, renandarosa@gmail.com, julio.buchholz@acad.ufsm.br, wilian.jungues@acad.ufsm.br, amanda.fornari@acad.ufsm.br

RESUMO

O milho é uma das principais culturas agrícolas, mas seu manejo intensivo pode degradar o solo e aumentar a dependência de fertilizantes sintéticos. As plantas de cobertura (PCs) representam alternativa sustentável, pois favorecem a ciclagem de nutrientes, conservação da umidade e melhoria da fertilidade. Este estudo avaliou combinações de PCs associadas a calcário e gesso, em Três de Maio-RS, com 22 tratamentos. Verificou-se acidez elevada e baixo teor de matéria orgânica na subsuperfície, fatores que limitam o desenvolvimento radicular. A aplicação de corretivos junto às PCs melhorou variáveis agronômicas do milho, como comprimento e diâmetro de espigas, número de grãos por fileira e massa de 100 grãos. O tratamento T14 (Aveia Preta + Calcário) apresentou os melhores resultados, destacando a interação entre biomassa e calagem. Já os tratamentos com pousio tiveram desempenho inferior, reforçando a importância do uso estratégico de plantas de cobertura para ganhos de fertilidade e produtividade.

Palavras-chave: . *Avena strigosa* . *Raphanus sativus*. *Zea mays.*

ABSTRACT

Corn is one of the main agricultural crops, but its intensive management can degrade the soil and increase dependence on synthetic fertilizers. Cover crops (CCs) represent a sustainable alternative, as they promote nutrient cycling, moisture conservation, and improved fertility. This study evaluated combinations of CCs associated with limestone and gypsum in Três de Maio-RS, across 22 treatments. High acidity and low organic matter content were observed in the subsurface, factors that limit root development. The application of amendments along with CCs improved agronomic variables of corn, such as ear length and diameter, number of grains per row, and the mass of 100 grains. Treatment T14 (Black Oats + Limestone) showed the best results, highlighting the interaction between biomass and liming. Fallow treatments had lower performance, reinforcing the importance of the strategic use of cover crops to enhance soil fertility and productivity.

Keywords: *Avena strigosa*. *Raphanus sativus. Zea mays.*

1 INTRODUÇÃO

A agricultura do século XXI enfrenta o desafio de aumentar a produção de alimentos com mínimo impacto ambiental (FOLEY et al., 2011; WITTWER et al., 2017). Quando conduzida de forma inconvencional, contribui para a degradação do solo e maior vulnerabilidade a eventos climáticos extremos (OBALUM et al., 2017; SCHRAMA et al., 2018). Nesse contexto, o solo atua como memória dos sistemas produtivos, reservatório de nutrientes e potencial sumidouro de carbono (DOS SANTOS et al., 2024).

O milho (Zea mays L.) destaca-se como o cereal de maior importância econômica, com 1,2 bilhão de toneladas produzidas em 203 milhões de hectares (USDA, 2025). No entanto, seu cultivo intensivo, muitas vezes em monocultura e com pousio descoberto, aumenta a dependência de insumos sintéticos e os impactos ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa (WOJCIECHOWSKI et al., 2023; DE MIRA; DE MIRA, 2025). Atualmente, é a cultura que mais consome fertilizantes no mundo, com cerca de 16% do uso global (WOJCIECHOWSKI et al., 2023).

Nesse cenário, o uso de plantas de cobertura (PC) em rotação de culturas surge como alternativa sustentável, contribuindo para conservação do solo, maior eficiência no uso de nutrientes e mitigação de impactos ambientais (ĆUPINA et al., 2004; BLANCO-CAQUI, 2018). As PCs proporcionam benefícios como redução da necessidade de fertilizantes nitrogenados (KLONSKY, 2012; BLESH, 2018), conservação da umidade e redução da lixiviação (GABRIEL; MUÑOZ-CARPENA; QUEMADA, 2012), controle da erosão (NAZIR et al., 2024), preservação da água (BLANCO-CANQUI et al., 2018), aumento da matéria orgânica e biodiversidade (MCDANIEL; TIEMANN; GRANDY, 2014; URENOVIĆ; FILIPOVIĆ, 2017).

No Brasil, aveia branca (Avena sativa L.) e aveia preta (Avena strigosa Schieb) são amplamente utilizadas, destacando-se pela produção de palhada, ciclagem de nutrientes e adaptação ao clima frio (MACHADO, 2001; STADTLOBER et al., 2022). Já o nabo forrageiro (Raphanus sativus L.) contribui para aeração do solo e reciclagem de nutrientes, atuando como subsolador natural no Sistema de Plantio Direto (HANSEN et al., 2023; MAIS SOJA, 2025).

Estudos apontam que a escolha da cultura de cobertura exerce forte influência no rendimento das culturas subsequentes (MOMESSO et al., 2021). Leguminosas como a ervilhaca podem substituir a adubação nitrogenada em cobertura, graças à fixação biológica de N, liberado ao solo durante sua decomposição (PES et al., 2021; MICHELON et al., 2019).

Diante disso, este estudo tem como objetivo avaliar os efeitos de diferentes combinações de plantas de cobertura sobre os atributos agronômicos do milho.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

A pesquisa foi conduzida em área de difusão de tecnologias da Agren Agronegócio, localizada no município de Três de Maio/RS em colaboração com o Laboratório de Agricultura de Precisão (LAPSul) da Universidade Federal de Santa Maria (Figura 1).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 1 -. Área experimental mapeada utilizando a plataforma FieldView



Fonte: Autores.

2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O estudo foi realizado na área experimental da empresa Agreen Agronegócios no munícío de Três de Maio/RS, situada nas coordenadas 23°23'51" de Latitude Sul e 53°25'38" de Longitude Oeste. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Cfa, caracterizado como subtropical úmido (KÖPPEN, 1936). A temperatura média anual é de 19,1°C, com extremos que variam entre 38°C (máximas) e 0°C (mínimas). O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho distrófico, conforme descrito por Borba et al. (2020).

As características de solo da área experimental foram avaliadas por meio de análises químicas do solo em duas profundidades distintas, na camada 0-0,20 m e 0,20-0,40m.

O experimento foi conduzido em delineamento de parcelas subdivididas, com quatro repetições e 22 tratamentos, avaliando a sucessão de culturas pré-milho na safra 2023/24. Os tratamentos combinaram diferentes plantas de cobertura e condicionadores de solo (calcário e gesso), além de pousio para comparação: T1 = Pré-Milho - RX 520 (Recomendação da empresa - 50 kg ha-1); T2 = Pré-Milho - RX 520 (Recomendação empresa - 50 kg ha-1) + Calcário; T3 = Pré-Milho - RX 520 (Recomendação empresa - 50 kg ha-1) + Gesso; T4 = Pré-Milho - RX 520 (Recomendação empresa - 50 kg ha-1) + Calcário + Gesso; T5 = Pré-Milho - RX 410 (Recomendação empresa - 40 kg ha-1); T6 = Pré-Milho - RX 410 (Recomendação empresa - 40 kg ha-1) + Calcário; T7 = Pré-Milho - RX 410 (Recomendação empresa - 40 kg ha-1) + Gesso; T8 = Pré-Milho - RX 410 (Recomendação empresa - 40 kg ha-1) + Calcário + Gesso; T9 = Aveia Preta IPR 139 (50 kg ha-1); T10 = Aveia Preta IPR 139 (50 kg ha-1) + Calcário; T11 = Aveia Preta IPR 139 (50 kg ha-1) + Gesso; T12 = Aveia Preta IPR 139 (50 kg ha-1) + Calcário + Gesso; T13 = Aveia Preta semente salva (50 kg ha-1); T14 = Aveia Preta semente salva (50 kg ha-1) + Calcário; T15 = Aveia Preta semente salva (50 kg ha-1) + Gesso; T16 = Aveia Preta semente salva (50 kg ha-1) + Calcário + Gesso; T17 = Nabo Forrageiro (10 kg ha-1); T18 = Nabo Forrageiro (10 kg ha-1) + Calcário; T19 = Pousio; T20 = Pousio + Calcário; T21 = Pousio + Gesso; T22 = Pousio + Calcário + Gesso.

A semeadura das coberturas ocorreu em 11/05/2023, com espaçamento de 0,17 m, sem adubação. No florescimento, quantificaram-se massa verde e seca, seguido da dessecação em 01/08/2023. O milho (híbrido DKB 230) foi semeado em

24/08/2023, visando 80 mil plantas ha^{-1}, com adubação de base conforme análise de solo (0–0,20 m).

Na maturação fisiológica, foram colhidas 10 espigas por repetição para mensuração de: comprimento e diâmetro de espiga, número de fileiras e grãos por fileira, número de grãos por espiga e peso de 100 grãos. A produtividade foi estimada a 13% de umidade. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo programa SISVAR, com teste de Scott-Knott a 5%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O solo analisado apresenta na camada de 0-20 cm pH em água do solo (6,2) apresenta condição levemente ácida, ideal para disponibilidade de nutrientes. A ausência de alumínio trocável (0 cmolc/dm³) elimina riscos de toxidez (SOBRAL et al., 2015). O índice SMP (6,4) e acidez potencial (H+Al = 2,5 cmolc/dm³) confirmam que não há necessidade imediata de calagem. O teor de matéria orgânica (2,1 dag/kg) está baixo (SBCS, 2004), indicando menor capacidade de retenção hídrica e nutricional, além de atividade biológica reduzida. Recomenda-se incremento através de adubos orgânicos e cobertura vegetal.

Os teores de P (21,4 mg/dm³) e K (296 mg/dm³) estão altos, dispensando adubação complementar no curto prazo. O cálcio (4,2 cmolc/dm³) e o magnésio (1,9 cmolc/dm³) apresenta nível alto. O enxofre (10,75 mg/dm³) encontra-se em nível muito alto. Quanto aos micronutrientes, manganês (68,81 mg/dm³), cobre (20,05 mg/dm³) e zinco (6,26 mg/dm³) apresentam teores muito elevados. O boro (0,5 mg/dm³) está alto, (SBCS, 2004).

Na camada subsuperficial (0,20-0,40 m), os resultados da análise química revelam condições edáficas mais limitantes em comparação com a camada superficial. O pH em água de 5,3 indica acidez elevada, com saturação por alumínio atingindo 13,7%, valor que excede o limiar de tolerância para a maioria das culturas. A saturação por bases de 39,46% encontra-se abaixo da faixa considerada ideal, refletindo desequilíbrio na disponibilidade de cátions básicos. Estes parâmetros, associados aos baixos teores previamen

e identificados de MO (1,2 dag/kg) e P (2,5 mg/dm³), caracterizam um ambiente químico desfavorável ao desenvolvimento radicular profundo.

A presença de alumínio trocável (0,5 cmolc/dm³) em conjunto com a acidez potencial elevada (H+Al = 5,6 cmolc/dm³) configura condições restritivas à exploração do perfil do solo pelas plantas. Os teores de micronutrientes apresentam comportamento similar ao da camada superficial, com exceção do boro (0,15 mg/dm³), que se mantém em nível crítico.

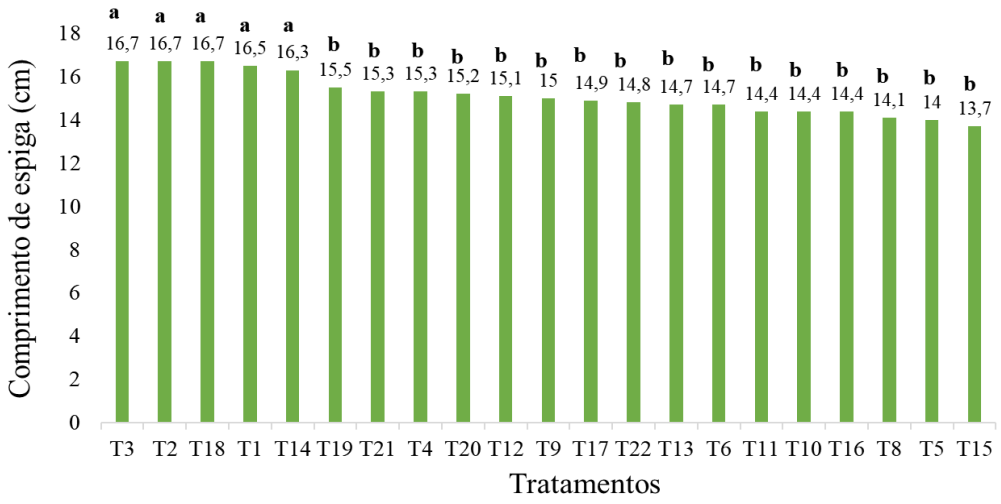
3.1 COMPRIMENTO DE ESPIGA

A Figura 2 apresenta os resultados do comprimento das espigas de milho submetidas a diferentes manejos de cobertura vegetal e correção do solo. Resultando diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, o que indica que tanto o tipo de cobertura quanto a adubação corretiva influenciam diretamente o desempenho da cultura.

ISBN 978-65-990392-6-3

Os tratamentos T2, T3 e T18 formaram o grupo de maior desempenho, com comprimentos médios de espiga comprimento mediode 16,7 cm, destacando-se significativamente em relação aos demais. Essas combinações incluíram o uso da cobertura RX 520 associada à aplicação de calcário e gesso, fatores que provavelmente melhoraram a estrutura do solo e a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Figura 2- Comprimento de espiga da cultura do milho em função de diferentes manejos – Safra 2023/24.



Comprimento médio de espigas de milho (cm) em função de diferentes manejos de plantas de cobertura, calcário e gesso, na safra 2023/24, em Três de Maio-RS. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).
Fonte: Autores, 2025

Castanheira e Nepomoceno (2022) destacam que a biomassa das plantas de cobertura contribui para o aumento da produtividade e do peso dos grãos de milho. De Sousa, Luis e Piletti (2016) evidenciam que a escolha adequada da cultura antecedente no sistema de plantio direto favorece a ciclagem de nutrientes e melhora a disponibilidade hídrica, fatores essenciais para o desenvolvimento das espigas.

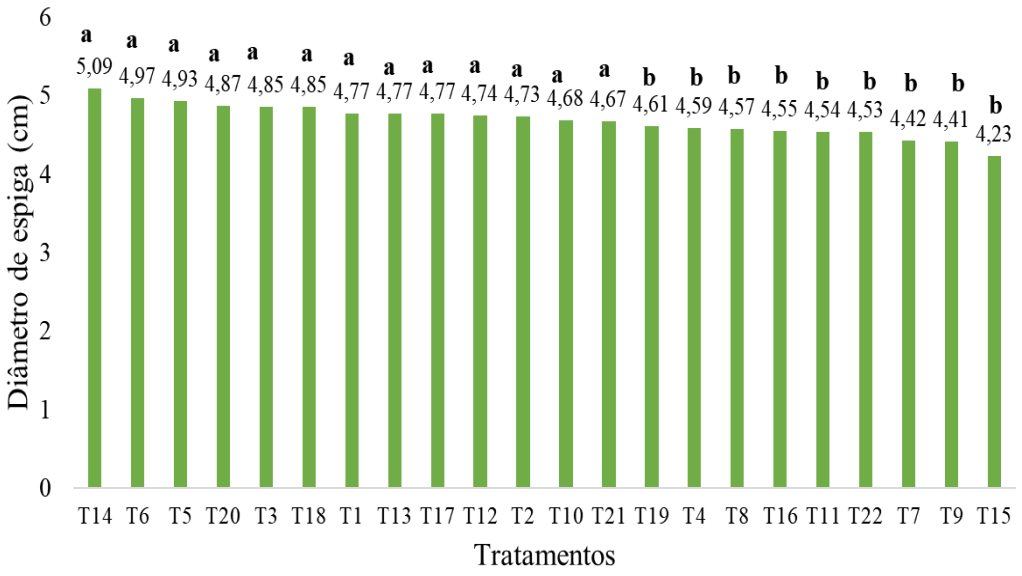
Além disso, Conte, Castro et al. (2016) apontam que o calcário neutraliza a acidez do solo, enquanto o gesso mitiga a toxicidade do alumínio em camadas subsuperficiais, criando um ambiente radicular mais favorável para a exploração do perfil do solo em busca de água e nutrientes. Estudos mais recentes apontam que a disponibilidade de nitrogênio favorece o crescimento da parte aérea, aumenta a absorção de nutrientes e resulta em maior rendimento de grãos, reforçando que a nutrição nitrogenada exerce papel fundamental no desenvolvimento das espigas e na produtividade da cultura (Sangoi et al., 2020).

3.2 DIÂMETRO DE ESPIGA

A aplicação de calcário promoveu aumento significativo no diâmetro das plantas (Figura 3), com destaque para os tratamentos T14 (Aveia Preta semente salva + Calcário), T6, T20 e T18, sendo T14 o mais expressivo (5,09 cm). O pousio sem

correção (T19) apresentou menor valor (4,61 cm), enquanto o pousio corrigido (T20) obteve 4,87 cm, superando inclusive alguns tratamentos com cobertura. Esses resultados evidenciam a relevância da calagem, que ao elevar o pH reduz a toxicidade de Al^{3+} e Mn^{2+} e favorece maior exploração radicular e absorção de nutrientes (VELOSO et al., 2012).

Figura 3- Diâmetro de espiga da cultura do milho em função de diferentes manejos – Safra 2023/24.



Legenda: Diâmetro médio de espigas de milho (cm) em função de diferentes manejos de plantas de cobertura, calcário e gesso, na safra 2023/24, em Três de Maio-RS. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).
Fonte: Autores, 2025

3.3 NÚMERO DE FILEIRA POR ESPIGA

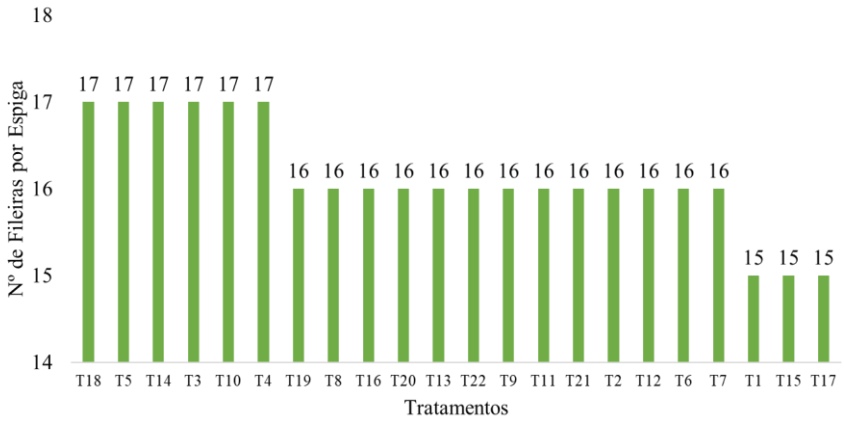
A calagem aumenta a disponibilidade de macronutrientes como P, N e Mo, fornece Ca e Mg, melhora a eficiência de fertilizantes e estimula a atividade microbiana, essencial à ciclagem de nutrientes (ZAPOTOSKI; FERREIRA, 2023). O tratamento T14 (Aveia Preta semente salva + Calcário) apresentou o maior diâmetro médio de colmo (5,09 cm), resultado da sinergia entre a biomassa da aveia preta e a correção da acidez do solo. A aveia contribui com elevada produção de palhada, que protege o solo, eleva a matéria orgânica, melhora a estrutura e cicla nutrientes como K, Ca e Mg (COSTA et al., 2014; CARNEIRO et al., 2008; SANTI; AMADO; ACOSTA, 2003).

Paralelamente, a calagem eleva o pH, neutraliza o Al tóxico e favorece o crescimento radicular (NATALE et al., 2012), além de aumentar o Ca na CTC e refletir em ganhos produtivos (MICHERI et al., 2016). Estudos ainda indicam que a aveia preta pode elevar concentrações de P, Ca e Mg nas folhas de milho, potencializando os efeitos da calagem (CAIRES et al., 2006). Embora a análise estatística do número de fileiras por espiga não tenha indicado diferenças significativas ($p > 0,05$), observou-se tendência de maiores valores nos tratamentos com calagem, especialmente em

T14, enquanto tratamentos apenas com gesso ou sem correção (T19 – Pousio) situaram-se entre os menores valores.

Embora a análise estatística do número de fileiras por espiga não tenha indicado diferenças significativas (p > 0,05), observou-se tendência de maiores valores nos tratamentos com calagem, especialmente em T14, enquanto tratamentos apenas com gesso ou sem correção (T19 – Pousio) situaram-se entre os menores valores, conforme apresentado na (Figura 4).

Figura 4- Número de fileiras por espiga da cultura do milho em função de diferentes manejos – Safra 2023/24.



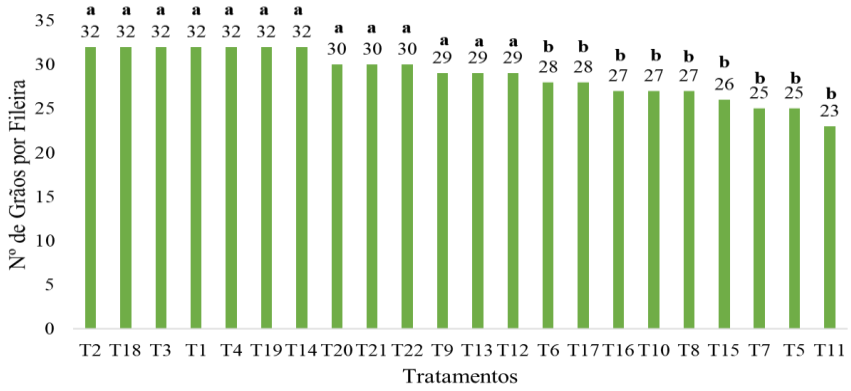
Legenda: Número de fileiras por espiga da cultura do milho em função de diferentes manejos de plantas de cobertura, calcário e gesso, na safra 2023/24, em Três de Maio-RS. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott (p < 0,05).
Fonte: Autores, 2025

3.4 NÚMERO DE GRÃOS POR FILEIRA

O número de grãos por fileira é um dos componentes de rendimento do milho diretamente correlacionado com a produtividade final e reflete a eficiência do processo reprodutivo da cultura, sendo influenciada por fatores genéticos, ambientais e de manejo do solo. As diferenças estatísticas significativas observadas entre os tratamentos do presente estudo (p > 0,05) sublinham a sensibilidade dessa variável às práticas de manejo do solo, especialmente a correção da acidez e o uso de plantas de cobertura (Figura 5).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 5- Número de grãos por fileiras da cultura do milho em função de diferentes manejos – Safra 2023/24.

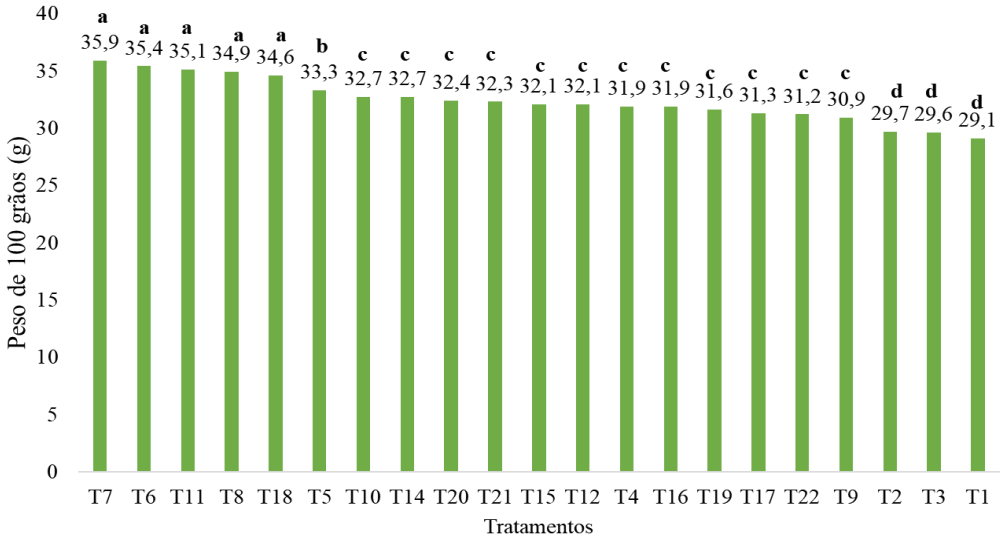


Legenda: Número de grãos por fileiras da cultura do milho em função de diferentes manejos de plantas de cobertura, calcário e gesso, na safra 2023/24, em Três de Maio-RS. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).
Fonte: Autores, 2025

3.5 MASSA DE 100 GRÃOS

A massa de 100 grãos apresentou diferença significativa entre os tratamentos na safra 2023/24 (Figura 6). Os maiores valores foram observados nos tratamentos com RX 520, especialmente T2 (RX 520 + Calcário) e T4 (RX 520 + Calcário + Gesso), evidenciando o efeito positivo da correção do solo associada ao mix RX 520. Os tratamentos com RX 410 (T5 a T8) tiveram bom desempenho, mas inferior ao da RX 520.

Figura 6- Peso de 100 grãos (g) da cultura do milho em função de diferentes manejos – Safra 2023/24.



Legenda: Peso de 100 grãos da cultura do milho em função de diferentes manejos de plantas de cobertura, calcário e gesso, na safra 2023/24, em Três de Maio-RS. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).
Fonte: Autores, 2025

Já os com aveia preta (T9 a T16) mostraram valores intermediários, enquanto nabo forrageiro (T17 e T18) e pousio (T19 a T22) apresentaram os menores resultados, indicando que a menor produção de resíduos e cobertura comprometeu a disponibilidade de nutrientes e o microclima para enchimento dos grãos. A massa dos grãos é condicionada por fatores genéticos, nutricionais e climáticos (OHLAND et al., 2005). As leguminosas favorecem altos rendimentos de milho (TORRES et al., 2005) e que a aveia contribui para a estruturação do solo e retenção de água, beneficiando o desenvolvimento dos grãos (DA GAMA-RODRIGUES et al., 2007).

3.3 DISCUSSÕES

Os maiores valores de número de grãos por fileira nos tratamentos T2 (RX 520 + Calcário), T4 (RX 520 + Calcário + Gesso) e T6 (RX 410 + Calcário) estão associados à calagem, que eleva o pH, neutraliza o Al tóxico e aumenta a disponibilidade de P, Ca e Mg (CAIRES et al., 2003). Esse ambiente radicular mais favorável permite maior absorção de nutrientes e melhor desenvolvimento das espigas, refletindo em maior número de grãos, efeito também observado por Zandoná et al. (2015) em milho sob semeadura direta. A adição de gesso agrícola, como em T4, potencializa esses efeitos, fornecendo Ca e S, promovendo lixiviação do Al em profundidade e favorecendo a síntese de proteínas e enchimento dos grãos (ZANDONÁ et al., 2015; MALAVOLTA, 2006), o que justifica sua superioridade em relação a T2.

O destaque de T14 (Aveia Preta + Calcário) evidencia a sinergia entre cobertura vegetal e correção da acidez. A aveia preta contribui com biomassa e palhada, melhorando propriedades do solo, ciclando nutrientes e fornecendo matéria orgânica (SANTI; AMADO; ACOSTA, 2003), o que complementa os efeitos da calagem e favorece a fase reprodutiva do milho.

Em contraste, T21 (Pousio + Gesso) e T22 (Pousio + Gesso + Calcário) apresentaram menores valores, mostrando a ineficácia do pousio frente ao uso de coberturas. A ausência de vegetação expõe o solo à degradação, compactação e perda de matéria orgânica (GUIMARÃES et al., 2024). Resultados semelhantes foram relatados por Gonzalez, Junior e De Souza (2020), além de Derpsch et al. (2010), que reforçam o papel das coberturas na preservação da fertilidade e no controle de plantas daninhas.

4 CONCLUSÃO

A utilização de espécies forrageiras, como a Aveia Preta (*Avena strigosa*) e o consórcio RX 520, em sistemas de manejo integrado, particularmente quando complementadas por calagem e, em alguns tratamentos, por gessagem agrícola. Tais aprimoramentos foram evidenciados pelo incremento no comprimento, diâmetro e número de grãos por fileira, bem como na massa de 100 grãos.

Em contraste, os tratamentos que empregaram pousio, mesmo após a correção do pH do solo, exibiram desempenho agronômico inferior aos sistemas que incorporaram cobertura vegetal. A sinergia entre a cobertura vegetal e a calagem foi particularmente proeminente no tratamento T14 (Aveia Preta + Calcário), que, consistentemente, apresentou os resultados mais favoráveis em múltiplos parâmetros agronômicos avaliados.

REFERÊNCIAS

ASSUNÇÃO FILHO, José Ribamar de et al. Selection of superior genotypes of lima bean landraces by multivariate approach. **Revista Caatinga**, v. 35, n. 1, p. 87-95, 2022.

BALOTA, Elcio L. et al. Benefits of winter cover crops and no-tillage for microbial parameters in a Brazilian Oxisol: A long-term study. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 197, p. 31-40, 2014.

BASSO, Vinicius Matheus; TRAVI, Magdalena Reschke Lajús. Produtividade e qualidade de aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb) sob uso de regulador de crescimento vegetal. **Anais de Agronomia**, v. 2, n. 1, p. 166-189, 2022.

BLANCO-CANQUI, Humberto et al. Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2449-2474, 2015.

BLANCO-CANQUI, Humberto. Cover crops and water quality. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 5, p. 1633-1647, 2018.

BORBA, Willian Fernando et al. Permeabilidade do solo em área de aterro sanitário. **Caderno de Geografia**, v. 30, n. 61, p. 272-272, 2020.

BLESH, Jennifer. Functional traits in cover crop mixtures: Biological nitrogen fixation and multifunctionality. **Journal of Applied Ecology**, v. 55, n. 1, p. 38-48, 2018.

BOAKOWICZ, Graziane et al. Nabo forrageiro como método biológico para descompactação do solo. In: Salão de Iniciação Científica. **Livro de Resumos**. Porto Alegre: UFRGS, 2007.

CABRAL, Cássia Michelle et al. Ataque e caracterização de danos de *Brevicoryne brassicae* (L.) (Hemiptera: Aphididae) em *Raphanus sativus* L. (Brassicaceae). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 7, p. e56711730303, 2022.

CAIRES, Eduardo Fávero et al. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 87-98, 2006.

CARNEIRO, Marco Aurélio Carbone et al. Produção de fitomassa de diferentes espécies de cobertura e suas alterações na atividade microbiana de solo de cerrado. **Bragantia**, v. 67, p. 455-462, 2008.

CARVALHO, Arminda M. de. **Uso de plantas de condicionantes com incorporação e sem incorporação ao solo: composição química e decomposição dos resíduos vegetais; disponibilidade de fósforo e emissão de gases**. 2005. 369 f. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2005. In: *Cerrado Adubação Verde*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2006.

CASTANHEIRA, Leonardo Trevizan; NEPOMOCENO, Taiane Aparecida Ribeiro. Influência das plantas de cobertura na produtividade de milho verão. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 25, n. 3, p. 190-196, 2022.

CHERUBIN, Maurício Roberto et al. **Guia prático de plantas de cobertura: espécies, manejo e impacto na saúde do solo**. Piracicaba: ESALQ/SOHMA, 2024.

COELHO, A. M. C. **Nutrição e adubação do milho**. Sete Lagoas: Embrapa, 2006. (Circular técnica).

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Produção de grãos é estimada em 330,3 milhões de toneladas na safra 2024/25**. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-graos-e-estimada-em-330-3-milhoes-de-toneladas-na-safra-2024-25#:~:text=Mercado%20%E2%80%93%20Neste%20levantamento%2C%20a%20Companhia,toneladas%20consumidas%20no%20mercado%20interno. Acesso em: 20 maio 2025.

CONTE, Ana Maria et al. Tempo de reação de calcário e gesso no desenvolvimento da planta de milho. **Revista Cultivando o Saber**, v. 6, n. 3, p. 10-25, 2013.

COSTA, Nídia R. et al. Acúmulo de nutrientes e decomposição da palhada de braquiárias em função do manejo de corte e produção do milho em sucessão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 2, p. 166-173, 2014.

CRUZ, José Carlos et al. **O produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2011.

ĆUPINA, Branko et al. The importance and role of cover crops in sustainable agriculture. **Zbornik radova Instituta za ratarstvo i povrtarstvo**, n. 40, p. 419-430, 2004.

DAHLEM, Ana Regina. **Plantas de cobertura de inverno em sistemas de produção de milho sob plantio direto no Sudoeste do Paraná**. 2013. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.

DE CARVALHO, Igor Quirrenbach et al. Espécies de cobertura de inverno e nitrogênio na cultura do milho em sistema de plantio direto. **Scientia Agraria**, v. 8, n. 2, p. 179-184, 2007.

DE MIRA, Artemio Bezerra; DE MIRA, Acácio Bezerra. A química verde aplicada à agronomia na produção de insumos agrícolas sustentáveis: uma revisão bibliográfica. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 2, n. 1, p. 1-26, 2025.

DE SOUZA, Luiz Carlos Ferreira; LUIS, Afonso Jose; PILETTI, Ligia Maria Maraschi da Silva. Características agronômicas do milho em função da cultura antecessora em

sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 15, n. 2, p. 272-280, 2016.

DERPSCH, Rolf et al. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1-25, 2010.

DOS SANTOS BRUNING, Matheus; SIMONETTI, Ana Paula Morais Mourão; BOIAGO, Nayara Parisoto. Produção e desenvolvimento da cultura do milho sob dosagens de magnésio via foliar. **Revista Cultivando o Saber**, p. 108-119, 2023.

DOS SANTOS, Alan Francisco et al. Biometria e estado nutricional da cultura da aveia branca (Avena sativa L.) sob inoculação com Bacillus subtilis e B. megaterium. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 5, p. e53410515270, 2021.

DOS SANTOS, Karen Rabêlo et al. Influência das práticas de manejo e adubação biológica na atividade microbiana do solo. **Revista Master - Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 9, n. 18, 2024.

FERREIRA, Cibelle Christine Brito et al. Desenvolvimento do comprimento e diâmetro das espigas de milho em resposta a doses crescentes de nitrogênio. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. **Anais...** Florianópolis: SBCS, 2013.

FOLEY, Jonathan A. et al. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, v. 478, n. 7369, p. 337-342, 2011.

GABRIEL, José Luis; MUÑOZ-CARPENA, Rafael; QUEMADA, Miguel. The role of cover crops in irrigated systems: Water balance, nitrate leaching and soil mineral nitrogen accumulation. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 155, p. 50-61, 2012.

GAMA-RODRIGUES, Antonio Carlos da; GAMA-RODRIGUES, Emanuela Forestieri da; BRITO, Elio Cruz de. Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos culturais de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho-Amarelo na região noroeste fluminense (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1421-1428, 2007.

GONZÁLEZ, María Emilia Brusquetti; JUNIOR, Izaias Rodrigues Da Silva; DE SOUZA, Luiz Carlos Ferreira. Yield components and productivity of maize as a function of predecessor crop. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 19, p. 10-10, 2020.

GUIMARÃES, N. N. et al. Interferência do pousio no manejo de plantas daninhas: um estudo teórico. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 3, p. e5707, 2024.

HANSEN, Pedro Henrique et al. Nabo forrageiro: potencialidades da espécie como descompactador do solo, reciclador de nutrientes e produtor de biomassa. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 2, p. e11612239863, 2023.

KLEIN, Mathias Sasseti et al. Uso de espécies de cobertura de inverno na supressão de plantas daninhas na produtividade de feijão-preto. In: Encontro Sul-Brasileiro de Fitossanidade, v. 1, **Anais do …**, 2022.

KLONSKY, Karen. Comparison of production costs and resource use for organic and conventional production systems. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 94, n. 2, p. 314-321, 2012.

KOLTUN, Yurei et al. Efeito do extrato de plantas de cobertura de inverno sobre fitopatógenos de solo. **Scientific Electronic Archives**, v. 16, n. 7, 2023.

KUNZ, Douglas Wegner et al. Desempenho agronômico da aveia preta conduzida com semeadura a lanço e em linha. **Investigación Agraria**, v. 25, n. 2, p. 88-92, 2023.

LIMA, Luis Felipe et al. Balanço energético da cultura nabo forrageiro visando à produção de biodiesel. **Magistra**, v. 29, n. 2, p. 208-214, 2017.

LIMA, Rosangela; LAJÚS, Cristiano. Potencial alelopático do extrato da parte aérea do nabo forrageiro (Raphanus sativus L.) sobre o crescimento inicial do milho (Zea mays L.) em casa de vegetação. **Enciclopédia Biosfera**, v. 18, n. 37, 2021.

LOPES, Ana Paula Mendes. **Mix de plantas de cobertura no manejo de Meloidogyne e Pratylenchus brachyurus na cultura da soja**. 2023. Tese (Doutorado em Agronomia/Proteção de Plantas) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2023.

MACHADO, Luís Armando Zago. **Aveia**: forragem e cobertura do solo. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2000.

MALAVOLTA, Eurípedes. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MCDANIEL, Marshall D.; TIEMANN, Lisa K.; GRANDY, A. Stuart. Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? **A meta-analysis. Ecological Applications**, v. 24, n. 3, p. 560-570, 2014.

MICHELON, Cleudson José et al. Atributos do solo e produtividade do milho cultivado em sucessão a plantas de cobertura de inverno. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n. 2, p. 230-239, 2019.

MICHERI, P. H. et al. Efeito a longo prazo da calagem superficial na cultura do milho em sistema plantio direto. In: Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 31., 2016, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: ABMS, 2016. p. 473. Disponível em: https://www.abms.org.br/cnms2016_trabalhos/docs/1076.pdf. Acesso em: 28 maio 2025.

MOMESSO, Letusa; CRUSCIOL, Carlos Alexandre Costa; SORATTO, Rogério Peres; TANAKA, Katiuça Sueko; COSTA, Claudio Hideo Martins; BASTOS, Leonardo

Mendes; CIAMPITTI, Ignacio Antonio. Cover crop and early nitrogen management for common bean in a tropical no-till system. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 6, p. 4969-4981, 2021. DOI: https://doi.org/10.1002/agj2.20881.

MORALES, Marianela Estefanía et al. Response of root exudates and bacterial community to N fertilization and termination methods in Avena sativa L. as a winter cover crop model. **European Journal of Soil Biology**, v. 114, p. 103453, 2023.

NATALE, William et al. Acidez do solo e calagem em pomares de frutíferas tropicais. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, p. 1294-1306, 2012.

NAZIR, Muhammad Junaid et al. Harnessing soil carbon sequestration to address climate change challenges in agriculture. **Soil and Tillage Research**, v. 237, p. 105959, 2024.

OBALUM, S. E. et al. Soil organic matter as sole indicator of soil degradation. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, p. 1-19, 2017.

OHLAND, Regiani Aparecida Alexandre et al. Culturas de cobertura do solo e adubação nitrogenada no milho em plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, p. 538-544, 2005.

OLIVEIRA, Tadário Kamel de; CARVALHO, Gabriel José de; MORAES, Raimundo Nonato de Souza. Plantas de cobertura e seus efeitos sobre o feijoeiro em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1079-1087, 2002.

PES, Luciano Zucuni et al. Hairy vetch role to mitigate crop yield gap in different yield environments at field level. **Scientia Agricola**, v. 79, n. 5, p. e20200327, 2021.

RUFFO, Matias L.; BULLOCK, Donald G.; BOLLERO, German A. Soybean yield as affected by biomass and nitrogen uptake of cereal rye in winter cover crop rotations. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 3, p. 800-805, 2004.

SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; SILVA, P. R. F.; VARGAS, V. P. Nitrogênio disponível ao milho: crescimento, absorção e rendimento de grãos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 6, p. 381-387, 2020. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v24n6p381-387.

SANTI, A.; AMADO, T. J. C.; ACOSTA, J. A. A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I - Influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 1075-1083, 2003.

SANTOS, Leslei Caroline. **Características agronômicas e nutricionais da forragem e feno da aveia preta Embrapa 139 pós cultivo de crotalaria ou milho**. 2022. 81 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2022.

SBCS - SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. NÚCLEO REGIONAL SUL. **Manual de adubação e de calagem**: para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Comissão de Química e Fertilidade do Solo-RS/SC, 2004.

SCHRAMA, M. et al. Crop yield gap and stability in organic and conventional farming systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 256, p. 123-130, 2018.

SILVA, Mariana Aguiar et al. Plantas de cobertura isoladas e em mix para a melhoria da qualidade do solo e das culturas comerciais no Cerrado. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e11101220008-e11101220008, 2021.

SOBRAL, Lafayette Franco et al. **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015.

TOPAKCI, Mehmet et al. Sesame hill dropping performance of a vacuum seeder for different tillage practices. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 27, n. 2, p. 203-209, 2011.

UGRENOVIĆ, Vladan; FILIPOVIĆ, Vladimir. Cover crops: Achievement of sustainability in the ecological systems of agriculture. In: Sustainable entrepreneurship and investments in the green economy. IGI Global, **Anais ...**, 2017. p. 257-281.

USDA – U. S. Department Of Agriculture. **Global Production**. Disponível em: https://www.fas.usda.gov/data/production?commodity=almonds&commodity=corn. Acesso em: 20 maio 2025.

VELOSO, Carlos Alberto Costa et al. **Produtividade do milho no Oeste do Pará em função de doses de calcário e gesso**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2012.

VENTUROSO, Luciano Reis et al. Produção de soja e germinação carpogênica de Sclerotinia sclerotiorum sob diferentes coberturas de solo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 2, p. 615-626, 2013.

VIER, Caroline Rack et al. Avaliação da qualidade de sementes de forrageiras hibernais de origem salva e certificada. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 13, p. e11790-e11790, 2024.

WITTWER, Raphaël A. et al. Cover crops support ecological intensification of arable cropping systems. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 41911, 2017.

WOJCIECHOWSKI, Alexandre et al. Effects of cover crops on maize establishment, root mycorrhizal colonization, plant growth and grain yield depend on their botanical family: A global meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 356, p. 108648, 2023.

ZAPOTOSKI, Robson Gustavo Trigo; FERREIRA, Kelly Cristina. Agrominerais-fertilizantes e corretivos de acidez do solo. **Revista Foco**, v. 16, n. 12, p. e3622-e3622, 2023.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 25

DESEMPENHO DA CULTURA DA SOJA SOB DIFERENTES MANEJOS FITOSSANITÁRIOS E REGIMES HÍDRICOS

Performance of soybean culture under different phytosanitary managements and water regimes

Richard Massirer Prochnow[1]; Raissa Wolffenbüttel[1]; Érika Batista Feron[1]; João Gabriel Fortes Peixoto[1]; Dienifer Weirich Lopes[1]; Lorenzo Isasmendi da Silveira[1]; Milena Ferreira da Silva Zühl[1]; Alberto Eduardo Knies[2]

[1] Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs), Rua Sete de Setembro, nº. 1040, Centro, CEP 96508-010, Cachoeira do Sul - RS, Brasil, e-mail para contato <richard-prochnow@uergs.edu.br>.
[2] Eng. Agr., Me. em Ciência do Solo, Dr. em Eng. Agrícola. Prof. Adjunto da Uergs Unidade em Cachoeira do Sul - RS, alberto-knies@uergs.edu.br.

RESUMO

A soja é a principal cultura do agronegócio brasileiro, mas enfrenta desafios no manejo fitossanitário devido à pressão e resistência crescente de doenças e pragas. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho da cultura da soja sob diferentes manejos fitossanitários e regimes hídricos. Um experimento foi conduzido a campo em Cachoeira do Sul - RS, na safra 2024/25 em delineamento inteiramente casualizado com parcelas subdivididas com três repetições, bifatorial, sendo o fator A composto por 3 manejos fitossanitários (químico, biológico e misto) e, o fator D por 2 regimes hídricos (sequeiro e irrigado). Foram avaliadas a altura de plantas, o acamamento das plantas, a massa de mil grãos e a produtividade de grãos. A irrigação elevou a altura e a produtividade, mas aumentou o acamamento e reduziu a massa de mil grãos (MMG). Em sequeiro, a MMG foi superior, embora com menor rendimento. A integração entre irrigação e manejo químico apresentou maior desempenho produtivo, evidenciando-se como uma estratégia eficaz para a cultura.

Palavras-chave: Glycine max. Bioinsumos. Manejo integrado. Irrigação.

ABSTRACT

Soybean is the main crop of Brazilian agribusiness, but it faces challenges in phytosanitary management due to the increasing pressure and resistance of diseases and pests. In this context, the objective of this study was to evaluate the performance of soybean under different phytosanitary management practices and water regimes. A field experiment was conducted in Cachoeira do Sul – RS, during the 2024/25 growing season, using a split-plot design with three replications, in a bifactorial arrangement, where factor A consisted of three phytosanitary managements (chemical, biological, and mixed), and factor D of two water regimes (rainfed and irrigated). Plant height, lodging, thousand-grain weight (TGW), and grain yield were evaluated. Irrigation increased plant height and grain yield but also enhanced lodging and reduced TGW. Under rainfed conditions, TGW was higher, although with lower yield. The integration between irrigation and chemical management presented the highest productive performance, evidencing itself as an effective strategy for the crop.

Keywords: Glycine max. Bioinputs. Integrated management. Irrigation.

1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja apresenta grande importância para o agronegócio brasileiro, sendo uma das principais responsáveis pelo protagonismo do Brasil no mercado agrícola global. Um dos destaques nacionais nesse cenário é a liderança mundial no uso de bioinsumos na cultura da soja, resultado de décadas de investimento em pesquisa, desenvolvimento industrial, adesão tecnológica por técnicos e produtores, além de recentes avanços na legislação para registro de novos produtos (SEIXAS et al., 2022).

Contudo, a intensificação produtiva e a baixa diversificação de culturas no sistema agrícola brasileiro têm gerado desafios crescentes no manejo fitossanitário, principalmente devido à sucessão de culturas que hospedam os mesmos patógenos e pragas (DEBIASI et al., 2020; SOARES et al., 2022). Esse cenário tem favorecido a incidência e a severidade de doenças foliares na soja, como a ferrugem-asiática (*Phakopsora pachyrhizi*), o complexo de doenças de final de ciclo – que inclui o crestamento foliar de *Cercospora* (*Cercospora* spp.) e a mancha-parda (*Septoria glycines*), a mancha-alvo (*Corynespora cassiicola*) e o oídio (*Erysiphe diffusa*) (SEIXAS et al., 2022).

Com o aumento da pressão dessas doenças, intensificou-se o uso de métodos de controle, principalmente químicos e biológicos, com menor ênfase nas práticas culturais. O Brasil possui atualmente mais de 50 milhões de hectares tratados com agentes de biocontrole, consolidando-se como o país com maior área sob uso desses produtos (BUENO et al., 2020). Os principais antagonistas empregados incluem fungos e bactérias como *Aspergillus flavus*, *Clonostachys rosea*, *Pochonia chlamydosporia*, diferentes espécies de *Trichoderma*, além de bactérias do gênero *Bacillus*, como *B. subtilis* e o *B. pumilus,* biofungicidas (BETTIOL et al., 2019; BUENO et al., 2020; MAPA, 2022).

No entanto, a resistência de fungos patogênicos aos fungicidas químicos de sítio-específicos tem se tornado um obstáculo relevante, reduzindo a eficiência desses produtos e sem a perspectiva de introdução de novos modos de ação em curto prazo (GODOY, 2023). Como alternativa, a integração de fungicidas biológicos aos programas de controle químico tem sido estimulada, com o objetivo de ampliar a eficácia e sustentabilidade do manejo. Dentre os produtos disponíveis, destacam-se formulações compostas por bactérias do gênero *Bacillus* e metabólitos microbianos, dada sua maior compatibilidade com os fungicidas químicos (SEIXAS et al., 2022; BRASIL, 2024).

Além disso, as condições de cultivo, como o uso de sistemas irrigados ou de sequeiro, influenciam diretamente a dinâmica das doenças e a eficiência dos tratamentos aplicados, sendo um fator determinante na escolha das estratégias de manejo. Embora a irrigação traga benefícios relacionados ao aumento da produtividade, ela pode também aumentar a suscetibilidade das plantas a diversas doenças, caso não sejam adotadas práticas adequadas de manejo integrado. O manejo hídrico, quando corretamente realizado, auxilia na redução da incidência de doenças ao interferir no microclima da lavoura, podendo evitar condições favoráveis à ocorrência de epidemias (BERGAMIN FILHO; KIMATI; AMORIM, 1995).

Há forte relação entre o tipo de irrigação utilizado e o desenvolvimento de doenças. Sistemas de irrigação por aspersão favorecem doenças da parte aérea, enquanto irrigação superficial e por gotejamento tendem a beneficiar doenças de solo

(LOPES; MAROUELLI; CAFÉ FILHO, 2006). O impacto das gotas d'água nas folhas pode dispersar esporos fúngicos e células bacterianas, ampliando áreas afetadas e favorecendo a disseminação entre plantas vizinhas (PINTO; COSTA; RESENDE, 2007). O manejo inadequado da irrigação, além de aumentar a incidência de doenças, podem provocar lixiviação de nutrientes, compactação do solo e comprometer a produtividade da cultura.

Especificamente na soja, a intensidade da ferrugem asiática tende a ser maior em lavouras irrigadas por pivô central, em comparação às irrigadas por gotejamento, devido ao molhamento foliar que promove a reinoculação do patógeno (JULIATTI et al., 2000).

Diante do exposto, este estudo objetivou avaliar o desempenho agronômico da cultura da soja sob diferentes manejos fitossanitários e regimes hídricos. De forma mais específica, busca-se analisar a produtividade de grãos, massa de mil grãos (MMG), bem como avaliar características morfológicas das plantas, como altura e acamamento, considerando as mesmas condições de manejo e disponibilidade hídrica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido a campo foi realizado no município de Cachoeira do Sul, no Estado do Rio Grande do Sul, na área experimental da Estação Agronômica da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), situada em latitude 29º 53'11,5'' S, longitude 53º 00'44.2'' W e altitude de 125 m. O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 2018) e o clima da região definido por Köppen como subtropical úmido.

O delineamento experimental adotado inteiramente casualizado com parcelas subdivididas com três repetições, bifatorial, sendo o fator A composto pelos diferentes sistemas de manejo fitossanitário na cultura da soja (biológico, químico e misto) e o fator B composto por 2 regimes hídricos (sequeiro e irrigado).

Os tratamentos fitossanitários foram definidos da seguinte forma:

Biológico: aplicação de produtos biológicos em quatro momentos do ciclo da cultura, utilizando os seguintes microrganismos: *Bacillus subtilis* (biofungicida de amplo espectro), *Bacillus pumilus* (biofungicida direcionado ao controle de doenças de final de ciclo) e os bioinseticidas *Saccharopolyspora spinosa, Chromobacterium subtsugae e Streptomyces avermectilis;*

Químico: aplicação de fungicidas e inseticidas químicos comerciais em quatro momentos, de acordo com as recomendações técnicas para a cultura da soja na região;

Misto: alternância entre aplicações biológicas e químicas ao longo do ciclo, de forma intercalada (biológico-químico-biológico-químico).

A semeadura foi realizada no dia 15 de novembro de 2024, com uso de semeadora de precisão, respeitando o espaçamento entre linhas de 50 cm. A cultivar utilizada foi a Brasmax Zeus IPRO (55I57RSF IPRO). A adubação adotada foi definida a partir do laudo da análise química do solo, e a recomendação conforme o Manual de Calagem e Adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (2016).

As aplicações dos defensivos químicos foram realizadas com o auxílio de trator e pulverizador agrícola, enquanto as aplicações dos biofungicidas e bioinseticidas foram efetuadas manualmente, utilizando pulverizador costal com capacidade de 20 litros. Em ambos os métodos de aplicação, foi adotado o mesmo volume de calda, correspondente a 100 litros por hectare.

As avaliações realizadas incluíram: produtividade da soja, expressa em sacas por hectare; altura das plantas, mensurada no estádio final do ciclo com fita métrica desde o solo até o último nó na haste principal da planta, massa de mil grãos (MMG), determinada com o auxílio de balança de precisão e gabarito para contagem; e índice de acamamento, avaliado conforme metodologia descrita por Carvalho et al. (2010), por meio de escala visual de notas de 1 a 5, sendo: 1 = todas as plantas eretas; 2 = algumas plantas inclinadas ou ligeiramente acamadas; 3 = todas as plantas moderadamente inclinadas ou 25 a 50% acamadas; 4 = todas as plantas severamente inclinadas ou 50 a 80% acamadas; e 5 = todas as plantas completamente acamadas.

A colheita foi realizada em uma área de 2 m² (2 linhas com 2 m de comprimento), com três repetições por tratamento. As plantas foram arrancadas manualmente e posteriormente trilhadas com o auxílio de um debulhador axial motorizado, sendo as amostras acondicionadas em saquinhos de papel devidamente identificados. Os grãos das amostras foram limpos com auxílio de peneiras, medida a umidade dos grãos com medidor apropriado e realizada sua pesagem. O peso obtido foi corrigido para uma umidade de 14% e adequado para um hectare. Também, dessa mesma amostra determinou-se a MMG (massa de mil grãos) a partir de 4 repetições de 100 grãos.

Considerou-se como água utilizada no regime de sequeiro somente a o acumulado de chuva no ciclo da cultura, enquanto que, no regime irrigado, considerou-se a o acumulado de chuva mais + irrigação.

Os dados coletados foram analisados com auxílio do software Sisvar versão 5.1, sendo submetidos à análise de variância e, os efeitos estatisticamente significativos pelo teste F foram discriminados pelo teste de LSD.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

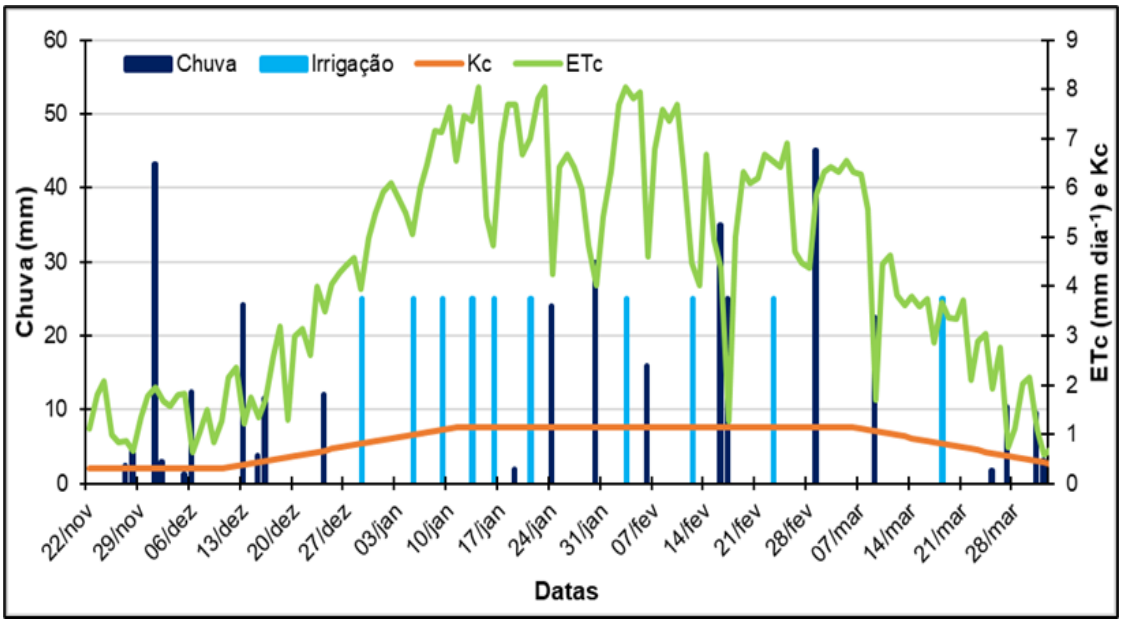
A safra 2024/25 foi significativamente influenciada pelo fenômeno La Niña, com maior impacto observado entre o final de dezembro de 2024 e fevereiro de 2025. De acordo com dados do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA, 2025), baseados em análises do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), os meses de dezembro de 2024 e janeiro de 2025 apresentaram anomalias de temperatura do Pacífico típicas de uma condição de La Niña, embora com tendência à neutralidade. Essa configuração climática resultou em precipitações irregulares e longos períodos de estiagem no Rio Grande do Sul, especialmente durante o verão (INPE, 2025).

A análise do balanço hídrico do experimento (figura 1) revelou que a evapotranspiração da cultura foi estimada em 576 mm, enquanto as precipitações acumuladas somaram 356 mm durante o ciclo. Diante desse déficit hídrico, foi necessária irrigação suplementar totalizando 250 mm, demonstrando que as condições naturais não foram suficientes para suprir a demanda hídrica da cultura da soja. Esse cenário ressalta a importância da irrigação como prática determinante para a estabilidade produtiva em regiões sujeitas a veranicos.

ISBN 978-65-990392-6-3

A análise estatística é apresentada na tabela 1. Houve efeito significativo do regime hídrico sobre altura de plantas, acamamento, MMG e produtividade. Os manejos fitossanitários afetaram significativamente a umidade dos grãos, MMG e produtividade. A interação entre os fatores foi estatisticamente significativa para MMG e produtividade, o que indica que o desempenho da cultura em relação aos manejos fitossanitários depende do regime hídrico a que está submetida. Os coeficientes de variação (CV) das variáveis avaliadas permaneceram dentro de limites aceitáveis, garantindo confiabilidade às análises estatísticas realizadas.

Figura 1. Balanço hídrico do experimento com a cultura da soja.



Fonte: Autores (2025).

Tabela 1. Resultados da análise estatística (f calculado) para as variáveis respostas avaliadas em função dos fatores analisados no experimento.

Fatores	Alt.	Acam.	Umid.	MMG	Prod.
Manejos fitos.	0,09^{ns}	1,00^{ns}	0,00*	0,02*	0,00*
Reg. hídricos	0,00*	0,00*	0,74 ^{ns}	0,00*	0,00*
Man.fitos. x reg. hídr.	0,07^{ns}	1,00^{ns}	0,26^{ns}	0,00*	0,00*
CV (%)	4,96	18,26	8,56	3,34	7,92
DMS	8,20	4,33	2,11	12,01	9,78

Onde: Manejos fitos.: manejos fitossanitários. Reg. hídricos: regimes hídricos. Man.fitos. x reg. hídr.: Análise da interação dos fatores sobre a variável resposta. CV: coeficiente de variação (%). DMS: diferença mínima significativa. Alt.: altura das plantas; Acam.: acamamento das plantas. Umid.: umidade dos grãos na colheita. MMG: massa de mil grãos. Prod.: produtividade de grãos. *Efeito significativo, quando Pr<0,05. ^{ns} Efeito não significativo, quando Pr>0,05. Fonte: Autores (2025).

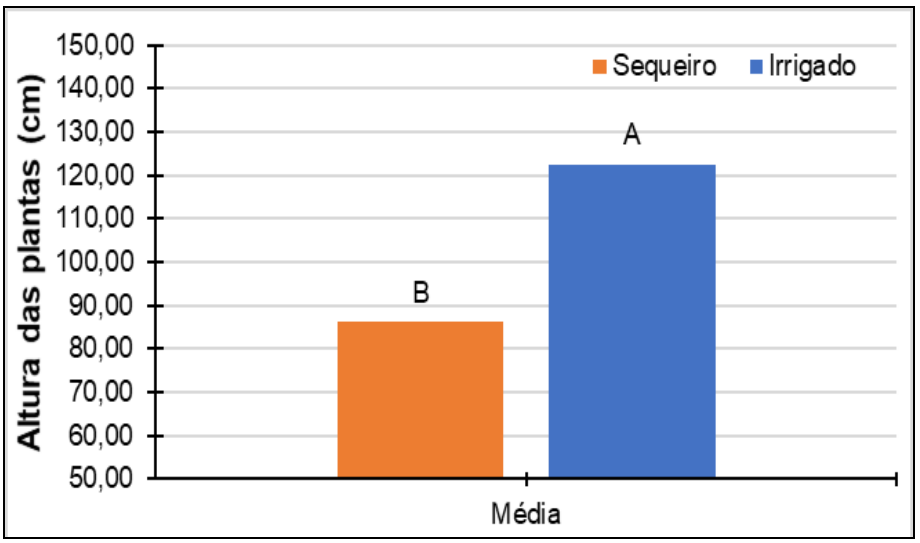
Os resultados agronômicos evidenciaram diferenças significativas entre os regimes hídricos. A altura média das plantas cultivadas sob irrigação foi de 123,4 cm, superando significativamente a altura observada no sequeiro, que foi de 89,3 cm,

ISBN 978-65-990392-6-3

conforme apresentado na figura 2. Esse crescimento mais vigoroso está relacionado à maior disponibilidade de água no solo, que favorece o alongamento celular e a expansão vegetativa, conforme descrito por Farias et al. (2017).

No entanto, o aumento do porte vegetativo trouxe como consequência o acamamento, que ocorreu em 30% das plantas sob irrigação, como indicado na Figura 2 Em contraste, nenhuma ocorrência de acamamento foi registrada no sequeiro. Esse fenômeno pode ser atribuído ao excesso de crescimento vegetativo, tornando as plantas irrigadas mais suscetíveis ao tombamento, conforme já relatado por Spear et al. (2019).

Figura 2. Altura média das plantas de soja em função dos regimes hídricos.

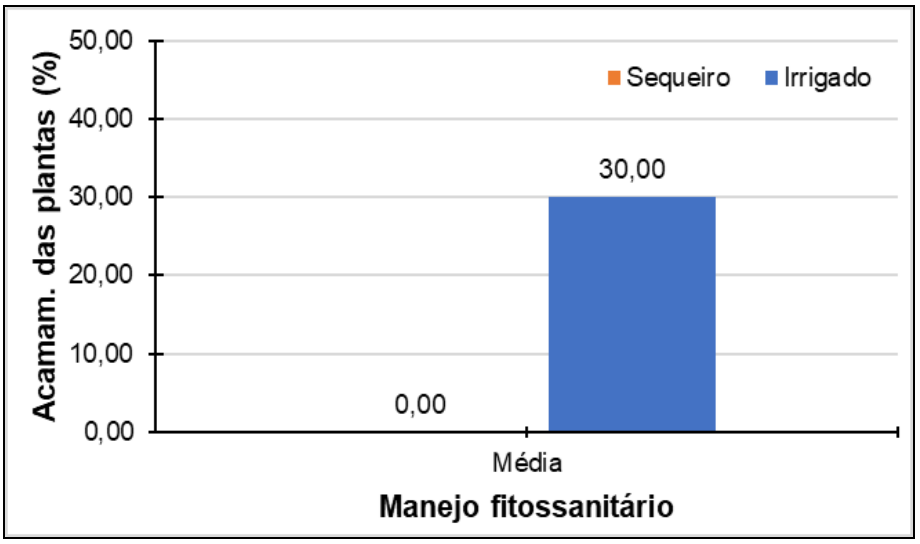


Fonte: Autores (2025).

Em relação à umidade dos grãos na colheita, observou-se efeito significativo dos manejos fitossanitários (figura 3). O manejo químico resultou nos maiores valores de umidade (17,8%), enquanto os manejos biológico e misto apresentaram valores próximos a 14,7%. Esse comportamento pode ser explicado pela ação dos defensivos químicos, que retardam a senescência das plantas, prolongando o ciclo e mantendo maior teor de água nos grãos.

ISBN 978-65-990392-6-3

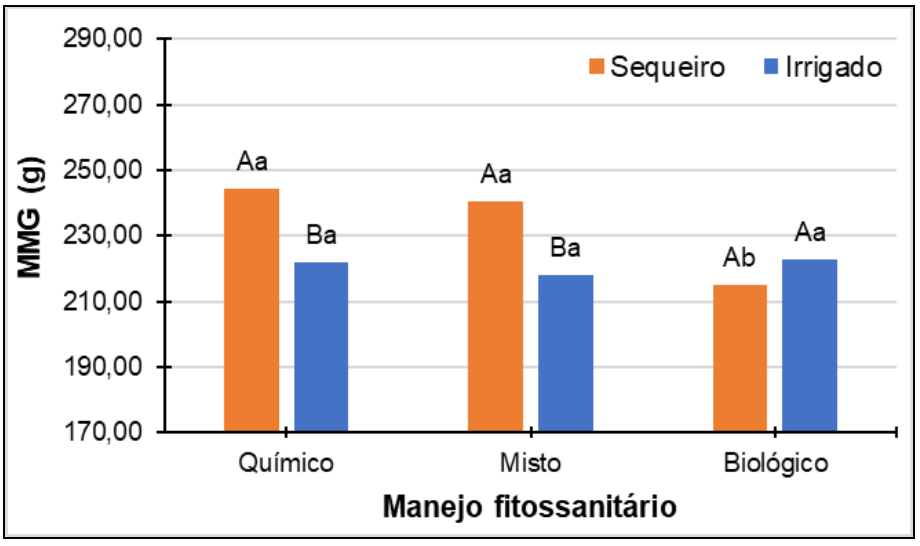
Figura 3. Percentual de acamamento das plantas de soja em função dos regimes hídricos.



Fonte: Autores (2025).

A massa de mil grãos (MMG) apresentou interação significativa entre os regimes hídricos e os manejos fitossanitários, conforme ilustrado na Figura 4. Em condições de sequeiro, os manejos químico e misto proporcionaram MMG superiores, com valores próximos a 240 g. Já sob irrigação, os valores foram menores, em torno de 225 g. Tal resultado pode ser explicado pela hipótese de diluição de fotoassimilados em plantas com maior crescimento vegetativo, o que compromete o acúmulo de massa nos grãos, como discutido por Sinclair e Rufty (2012).

Figura 4. Massa de mil grãos (MMG) em função dos regimes hídricos e manejos fitossanitários.

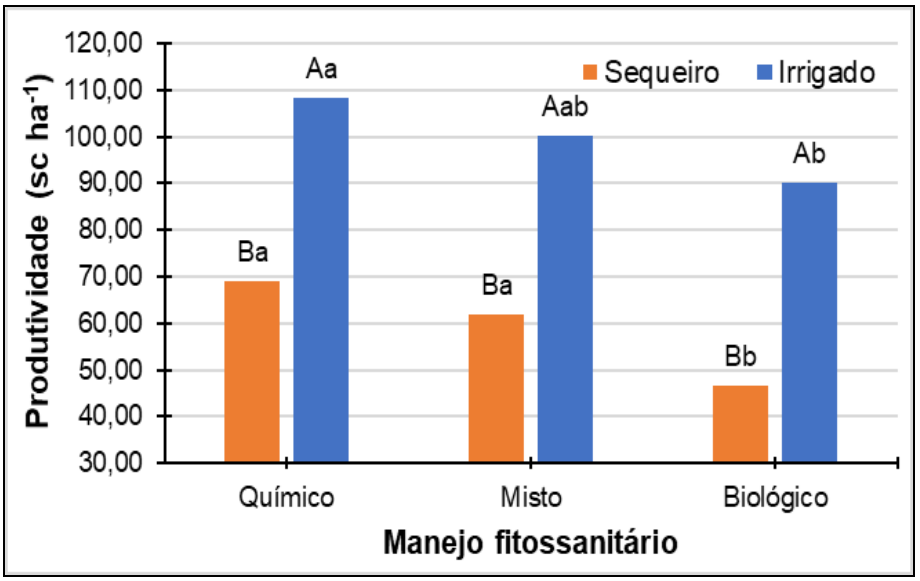


Fonte: Autores (2025).

A produtividade de grãos, variável de maior interesse agronômico, também foi significativamente influenciada pelos tratamentos (figura 5). O manejo químico no

regime irrigado proporcionou a maior produtividade (109,2 sc ha⁻¹), seguido pelo manejo misto (98,4 sc ha⁻¹) e pelo biológico (89,7 sc ha⁻¹). Em sequeiro, as produtividades foram consideravelmente inferiores, variando de 50,2 sc ha⁻¹ (manejo biológico) a 75,6 sc ha⁻¹ (manejo químico). Esses dados confirmam que a irrigação é um fator crítico para o desempenho produtivo da soja.

Figura 5. Produtividade da soja em função dos regimes hídricos e manejos fitossanitários.



Fonte: Autor (2025).

No regime irrigado, a produtividade média alcançada foi de 108,05 sc ha⁻¹, superando os índices médios observados no estado, conforme dados da CONAB (2025). Esse resultado confirma o elevado potencial produtivo da soja em ambientes com disponibilidade hídrica adequada. Em contrapartida, no regime de sequeiro, a produtividade média foi de 69,14 sc ha⁻¹, refletindo uma redução de aproximadamente 36% em relação ao sistema irrigado. Essa queda expressiva evidencia a elevada sensibilidade da cultura ao estresse hídrico, especialmente nas fases reprodutivas, como floração e enchimento de grãos (FARIAS et al., 2017; ZANON et al., 2018).

Um dado particularmente interessante foi o maior peso médio de mil grãos observado no sequeiro (244,25 g), em comparação ao irrigado (221,79 g). Embora paradoxal, esse resultado pode ser explicado pela menor formação de vagens e grãos sob estresse hídrico, o que reduz a competição por assimilados, favorecendo maior alocação de recursos aos grãos remanescentes (BOARD e KAHLON, 2011). No entanto, apesar do maior peso individual dos grãos no sequeiro, o menor número de estruturas reprodutivas limitou a produtividade final, evidenciando que a produtividade da soja depende de uma combinação equilibrada entre número de vagens, número de grãos por vagem e peso dos grãos.

A diferença de altura entre os regimes hídricos também foi marcante. As plantas irrigadas atingiram alturas entre 133 e 138 cm, enquanto no sequeiro, os valores variaram entre 79 e 85 cm. Esse crescimento mais acentuado sob irrigação está diretamente relacionado à maior disponibilidade hídrica, que favorece processos fisiológicos como elongação celular e fotossíntese. Contudo, o porte elevado

ISBN 978-65-990392-6-3

aumentou a ocorrência de acamamento, problema agronômico que compromete a colheita mecanizada e pode favorecer a incidência de patógenos em razão do microclima mais úmido próximo ao solo (SPEAR et al., 2019). Por outro lado, a ausência de acamamento no sequeiro, ainda que associada ao menor vigor vegetativo, não compensou as perdas em rendimento.

Esses resultados indicam que a irrigação é uma ferramenta essencial para aumentar a produtividade da soja, mas requer um manejo criterioso. Estratégias como o ajuste da densidade de semeadura, uso de reguladores de crescimento e escolha de cultivares menos suscetíveis ao acamamento devem ser adotadas em ambientes irrigados para garantir o equilíbrio entre crescimento vegetativo e estabilidade produtiva.

De forma geral, os dados obtidos nesta safra corroboram os resultados encontrados por Sentelhas et al. (2015) e Zanon et al. (2018), os quais ressaltam a importância da irrigação como prática essencial para garantir estabilidade produtiva em regiões com alta variabilidade climática. Ainda assim, os resultados evidenciam que a produtividade da soja não depende exclusivamente da disponibilidade hídrica, mas da interação entre fatores como manejo fitossanitário, arquitetura das plantas e eficiência fisiológica.

4 CONCLUSÃO

A combinação entre irrigação e manejo fitossanitário químico foi a mais eficiente para maximizar o desempenho agronômico da soja no presente estudo. Ainda que o regime de sequeiro tenha proporcionado grãos com maior peso e ausência de acamamento, essas características não compensaram a expressiva redução na produtividade.

Assim, torna-se evidente a necessidade de adoção de sistemas integrados de manejo, que combinem irrigação racional, escolha de cultivares adaptadas, práticas culturais sustentáveis e controle fitossanitário eficiente, como forma de garantir a resiliência e a estabilidade da produção de soja em diferentes condições edafoclimáticas.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento à Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS) pela disponibilização da Estação Agronômica, cuja estrutura foi fundamental para a condução e execução deste experimento.

REFERÊNCIAS

BOARD, J. E.; KAHLON, C. S. Formação do rendimento da soja: o que o controla e como pode ser melhorado. **Fisiologia e Bioquímica da Soja**, v. 8, p. 1-36, 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2024/25**. Brasília, 2025.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. 27 p. (Circular Técnica, 48).

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). **Fenômeno La Niña se aproxima do fim e entra na fase neutral**. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/noticias/fen%C3%B4meno-la-ni%C3%B1a-se-aproxima-do-fim-e-entra-na-fase-neutra#:~:text=No%20entanto%2C%20apenas%20em%20dezembro,um%20enfraquecimento%20gradual%20do%20fen%C3%B4meno. Acesso em: 16 jun. 2025.

IRGA (Instituto Rio Grandense do Arroz). **Neutralidade no Oceano Pacífico está presente desde meados de fevereiro**. 2025. Disponível em: https://irga.rs.gov.br/neutralidade-no-oceano-pacifico-esta-presente-desde-meados-de-fevereiro?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 04 jun. 2025.

MAMOUNA, L. **Emater/RS aponta queda de 30% na projeção da safra de soja na Expodireto 2025**. Correio do Povo, mar. 2025. Disponível em: https://www.correiodopovo.com.br/not%C3%ADcias/rural/expodireto/emater-rs-aponta-queda-de-30-na-proje%C3%A7%C3%A3o-da-safra-de-soja-na-expodireto-2025. Acesso em: 04 ago. 2025.

SENTELHAS, P. C. et al. O gap de produtividade da soja no Brasil – magnitude, causas e possíveis soluções para a produção sustentável. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 8, p. 1394-1411, 2015.

SPEAR, B. E. et al. Acamamento em soja: genética e manejo. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 5, p. 2414-2423, 2019.

ZANON, A. J. et al. Produtividade da soja no sul do Brasil: fronteira agrícola de expansão global. **Field Crops Research**, v. 219, p. 52-64, 2018.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 26

RELAÇÃO DOS NÍVEIS DE POTÁSSIO FOLIAR E ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) NA CULTURA DA SOJA

Relationship between leaf potassium levels and normalized difference vegetation index (NDVI) in soybean crop

Aline Lampert Dutra[1]; André Müllich[1]; Luiz Felipe Silveira Pavão[1]; Alessandro Carvalho Miola[1]; Ivan Carlos Maldaner[1]; Luciano Zucuni Pes [1]; Marcelo Silveira de Farias[1]; Cláudia das Neves Costa[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria - RS, Brasil, alinelampertvet@yahoo.com.br; andre.mullich@hotmail.com, felipepavao14@gmail.com, alessandro.miola@ufsm.br, ivan.maldaner@ufsm.br, lucianopes@politecnico.ufsm.br, marcelo.farias@ufsm.br, clauncosta@hotmail.com

RESUMO

A agricultura de precisão oferece um amplo e diversificado repertório de ferramentas para o diagnóstico nutricional em escala intratalhão. Entre os nutrientes-chave, o potássio (K^+) sustenta processos fisiológicos centrais da soja, enquanto o NDVI tornou-se o índice mais difundido para monitorar vigor do dossel por sensoriamento remoto. Este estudo buscou mapear a dinâmica espacial e temporal do K foliar e testar a associação linear entre K e NDVI em um talhão de soja (safra 2024/2025). Foram georreferenciados 13 pontos, amostrados em nove datas durante o ciclo a soja de V3 a R5.1. O K foi determinado por leitor portátil de íons (Fast-K/LAQUAtwin) e o NDVI extraído de imagens com buffer de 15 m por ponto. Os dados foram integrados em QGIS (interpolação IDW) e analisados por correlação de Pearson por data. Os resultados ilustraram mapas iniciais com coincidência entre NDVI baixo e teores de K^+ reduzidos em algumas áreas e a análise estatística por data revelou associações fracas e não significativas entre K foliar e NDVI ao longo do ciclo.

Palavras-chave: Potássio foliar. Sensoriamento remoto. Agricultura de precisão.

ABSTRACT

Precision agriculture offers a wide and diversified set of tools for nutritional diagnosis at the within-field scale. Among key nutrients, potassium (K^+) supports central physiological processes in soybean, while NDVI has become the most widespread index for monitoring canopy vigor through remote sensing. This study aimed to map the spatial and temporal dynamics of leaf K and to test the linear association between K and NDVI in a soybean field (2024/2025 season). Thirteen georeferenced points were sampled on nine dates during the soybean cycle from V3 to R5.1. K was determined using a portable ion meter (Fast-K/LAQUAtwin), and NDVI was extracted from images with a 15 m buffer per point. Data were integrated into QGIS (IDW interpolation) and analyzed by Pearson correlation for each date. The results illustrated initial maps showing coincidence between low NDVI and reduced K^+ levels in some areas, while statistical analysis by date revealed weak and non-significant associations between leaf K and NDVI throughout the cycle.

Keywords: Foliar potassium. Remote sensing. Precision agriculture.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão (AP) consolidou-se como um conjunto de tecnologias para medir e manejar a variabilidade espacial e temporal nas lavouras. Sensores e sistemas como o sistema global de navegação por satélite (GNSS), os sistemas de informação geográfica (SIG), monitores de colheita e plataformas de sensoriamento de reflectância, seja em infravermelho próximo, seja por sensoriamento remoto, permitem coletar, integrar e analisar dados georreferenciados do ambiente de produção (SHAHEB; SARKER; SHEARER, 2022). Ao explicitar os padrões de variação dentro do talhão, a AP viabiliza intervenções localizadas e, com isso, maior eficiência técnica e econômica do manejo.

Entre os nutrientes, o potássio (K^+) destaca-se pelo amplo papel fisiológico. Atua na ativação enzimática relacionada à respiração e à fotossíntese, regula o potencial osmótico e o funcionamento estomático, mantém a turgescência celular e atenua efeitos de íons potencialmente tóxicos, como o sódio (Na^+) (DIAS et al., 2019; LIMA et al., 2022). A cultura da soja apresenta elevada demanda por K, nutriente indispensável para sustentação do crescimento, composição proteica dos grãos e expressão do potencial produtivo (BUENO, 2023). Assim, diagnosticar adequadamente o estado nutricional de K^+ ao longo do ciclo é condição para o manejo assertivo.

No monitoramento por sensoriamento remoto, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* — Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) é, provavelmente, o indicador mais difundido. Obtido a partir da razão entre reflectâncias na banda espectral do vermelho e do infravermelho próximo, o NDVI tem sido empregado para mapear vigor do dossel, acompanhar o desenvolvimento das culturas e sinalizar estresses bióticos e abióticos, com rapidez, custo relativamente baixo e caráter não destrutivo, tanto a partir de satélites quanto de ARPs (aeronaves remotamente pilotadas) (BATISTA et al., 2024). Persiste, entretanto, a necessidade de compreender em que medida esse índice, associado sobretudo a biomassa e “verdor”, pode refletir variações de nutrientes específicos, como o K, especialmente ao longo de diferentes estádios fenológicos.

A relevância do estudo reside em avaliar se o NDVI pode servir como indicador auxiliar do estado nutricional de K em escala intratalhão, contribuindo para priorização de inspeções, ajuste de estratégias amostrais e, potencialmente, para o desenho de zonas de manejo. Ao discutir a força (ou ausência) dessa relação por estádio fenológico, pretende-se oferecer evidências práticas para o uso combinado de análises foliares e sensoriamento remoto no manejo potássico da soja.

Diante desse contexto, trabalhou-se com as seguintes hipóteses: (i) no estádio vegetativo, quando o dossel ainda não está saturado, poderia existir associação positiva e de baixa a média magnitude entre K foliar e NDVI; e (ii) no estádio reprodutivo, a mobilidade do K das folhas para estruturas reprodutivas e a própria saturação espectral do NDVI tenderiam a enfraquecer ou mesmo inverter essa associação. Dessa forma, este estudo investigou a relação entre o teor foliar de K^+ e o NDVI em um talhão de soja georreferenciado ao longo da safra 2024/2025. Objetivou-se mapear a dinâmica espacial e temporal do K foliar, mensurado por sensor iônico e posteriormente integrado em ambiente SIG, derivar mapas de NDVI em plataforma digital e quantificar, para cada data de coleta, a associação linear entre K e NDVI por meio do coeficiente de correlação de Pearson (r).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido em um talhão agrícola localizado na Área Agropecuária do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em Santa Maria - RS. O talhão está situado nas coordenadas geográficas centrais de Latitude 29º72'37" Sul e Longitude de 53º74'97" Oeste e altitude de aproximadamente 100 metros. O clima da região é o Cfa, subtropical úmido e com verões quentes, segundo a classificação de Köppen. O solo da região é classificado como Argissolo bruno acinzentado, que são solos que possuem horizonte subsuperficial argiloso, geralmente profundos, bem drenados e com alta suscetibilidade à erosão e degradação. Ocorrem em relevos suaves e ondulados. Podem apresentar limitações químicas devido à baixa fertilidade natural, forte acidez e alta saturação por alumínio. Podem ser usados com culturas anuais e campo nativo, preferencialmente com plantio direto e em rotação de culturas com plantas protetoras e recuperadoras do solo durante o inverno (RIO GRANDE DO SUL, 2021).

O talhão agrícola delimitado recebe a denominação "Barragem" (Figura 1). O estudo foi realizado na safra 2024/2025, quando o talhão estava ocupado com a cultura da soja em sistema plantio direto. Possui área de 3,3 hectares (ha) e para tal foi realizado um *grid* de amostragem de quatro pontos por hectare. Considerou-se esta metodologia de amostragem devido à capacidade de processamento de amostras coletadas para as avaliações foliares.

Figura 1 - Grid de amostragem do talhão Barragem.



Fonte: Autores (2025)

2.2 COLETA, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

O teor foliar de K foi determinado com leitor portátil de íons pelo método Fast-K/LAQUAtwin (equipamento cedido pela empresa Zeit), que permite diagnóstico *in situ*

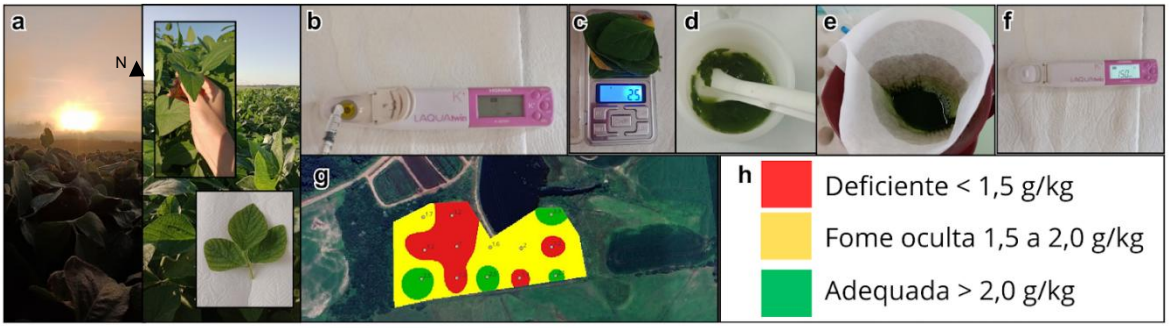
ISBN 978-65-990392-6-3

e imediato. Para fins operacionais do monitoramento, o equipamento classifica os resultados em três faixas: deficiente (plantas com teores abaixo da faixa crítica e sintomas visíveis), fome oculta (teores abaixo da faixa crítica, porém sem sintomas macroscópicos) e adequado (dentro da faixa de suficiência). No presente estudo, além dessa classificação qualitativa, utilizou-se o valor quantitativo do K foliar para as análises estatísticas.

Em cada ponto georreferenciado coletaram-se trifólios expandidos, sem pecíolo, do 3º ao 4º nó a partir do ápice, em aproximadamente cinco plantas por ponto em um raio de 15 metros para cada ponto de coleta. As coletas foram realizadas no início da manhã, a fim de minimizar perdas de umidade e variações térmicas (Figura 2). No laboratório, o leitor foi calibrado com soluções padrão de 150 e 2000 ppm de K^+. Em seguida, os trifólios foram pesados e macerados manualmente (macerador tipo pilão) em água na proporção de 15 ml por 1 g de massa verde. O extrato foi filtrado (suporte e filtro de papel) e a leitura do K^+ realizada no sensor LAQUAtwin. Todo o processamento foi feito no mesmo dia da coleta. O cálculo realizado por ponto em cada coleta foi com a Equação 1 de (OLIVEIRA et.al, 2019).

$$K\left(\frac{g}{kg}\right) = médiadasleiturasem \frac{ppm * volume \frac{final}{massa} de folhas}{1000} \quad (1)$$

Figura 2 - Sequência metodológica para determinação rápida do K foliar (Fast-K/LAQUAtwin) e geração de mapas de diagnóstico.

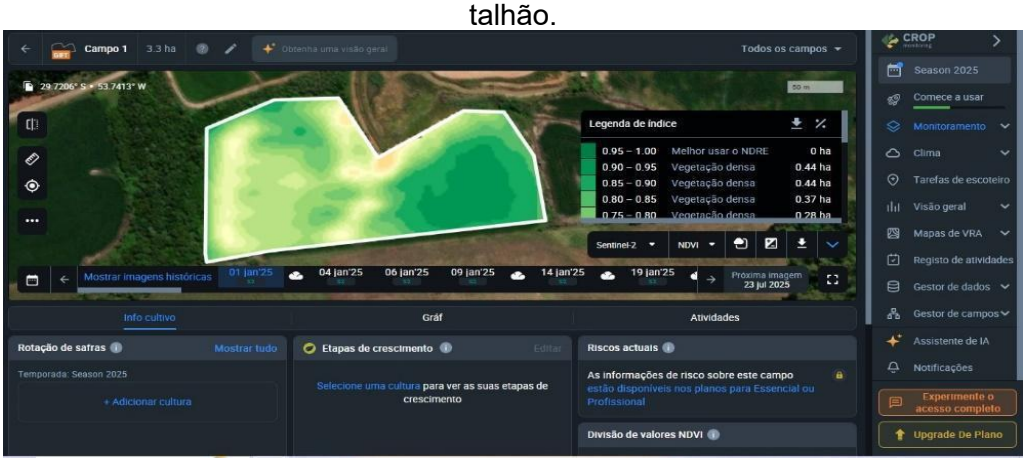


Legenda: (a) Coleta de trifólios nas primeiras horas da manhã; (b) calibração do leitor de íons K^+ (soluções-padrão de 150 e 2000 ppm); (c) pesagem do material foliar; (d) maceração com água (15 mL g^{-1} de massa verde); (e) filtração do extrato; (f) leitura do K^+ no LAQUAtwin; (g) elaboração dos mapas de diagnóstico em SIG; (h) classificação das áreas nas faixas deficiente, fome oculta e adequado.
Fonte: Autores (2025)

Após as leituras, os valores de K foliar (g kg^{-1}) de cada ponto georreferenciado foram tabulados em planilhas e importados para o QGIS (software livre) para a elaboração dos mapas de diagnóstico. A interpolação espacial foi realizada pelo método IDW (*Inverse Distance Weighted*), gerando a superfície contínua de K foliar por data de coleta. As análises espaciais foram realizadas no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000), projetado em coordenadas UTM, fuso 22S (EPSG: 31982). Em seguida, as superfícies foram reclassificadas por tabela em três faixas de interpretação: deficiente, fome oculta e adequado e representadas com simbologia discreta: tons de vermelho para deficiência, amarelo para fome oculta e verde para níveis adequados. Os mapas resultantes foram utilizados na análise e discussão dos resultados.

Durante o período experimental o talhão recebeu aplicação em taxa fixa de cloreto de potássio (KCl) na dose de 200 kg ha^{-1}, realizada em 09/12/2024, com a soja em estádio fenológico V3. Após essa intervenção, foram conduzidas as demais campanhas de amostragem foliar nas datas previstas. As imagens de sensoriamento remoto foram obtidas na plataforma *online* EOSDA *Crop Monitoring* (Figura 3). As cenas foram processadas como *rasters* com resolução espacial de 5 m por pixel. Para cada data, calculou-se o NDVI e, para cada ponto georreferenciado (arquivo *shapefile*), extraiu-se o valor do NDVI do pixel correspondente, que foi utilizado nas análises de correlação. Os mapas de NDVI foram, então, reclassificados por tabela e simbolizados em quatro classes discretas: vegetação densa, vegetação moderada, vegetação escassa e solo exposto.

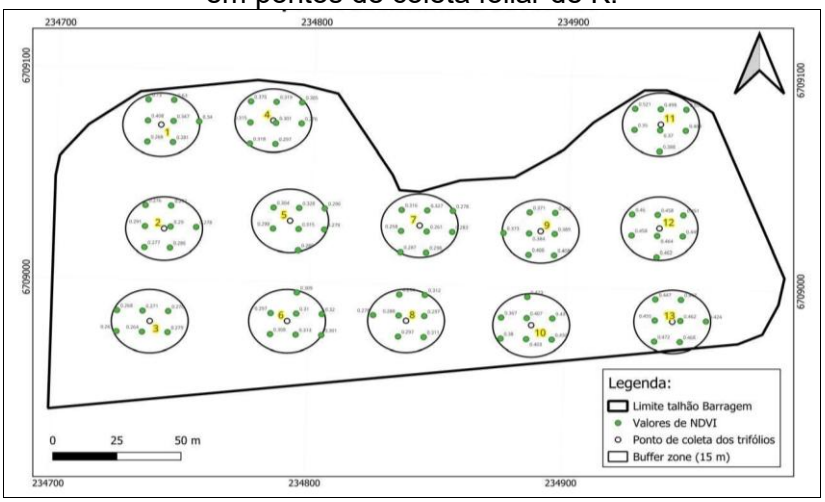
Figura 3 - Plataforma *EOSDATA Crop Monitoring* para obter imagens de NDVI do talhão.



Fonte: EOSDATA Crop Monitoring (2025)

Os dados foram processados no QGIS. Para cada ponto georreferenciado de coleta foliar de K^+, gerou-se um buffer circular de 15 m de raio (Figura 4). Dentro de cada buffer foram extraídos os valores de NDVI dos pixels correspondentes e calculada a média de NDVI por ponto e por data, a qual foi utilizada nas análises de correlação com o teor foliar de K^+.

Figura 4 - Distribuição dos valores de NDVI extraídos por Buffer Zones de 15 metros em pontos de coleta foliar de K.



Fonte: Autores (2025)

O relacionamento linear entre o teor foliar de potássio (K, g kg⁻¹) e o NDVI foi avaliado, por data de coleta, pelo coeficiente de correlação de Pearson (*r*), calculado conforme a Equação 2. A significância foi testada para H0:ρ=0 (bicaudal, α=0,05) com a função *cor.test* do software R (v. 4.3.x); quando indicado, intervalos de confiança de 95% foram obtidos pela transformação *z* de Fisher.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y-\bar{y})^2}} \quad (2)$$

Onde: xi e yi= observações dos dois atributos (K foliar e NDVI) em cada ponto *i*; $\bar{x}$ e $\bar{y}$ = médias amostrais; n = número de pares.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os mapas temáticos e as análises pontuais indicaram que, no início do ciclo, grande parte do talhão apresentou teores foliares de K^+ nas classes deficiente e fome oculta, com evolução gradual para a faixa adequada apenas nas coletas subsequentes (Figura 5). Esse comportamento é coerente com o papel fisiológico do potássio, embora o K não integre estruturalmente membranas ou organelas, é o cátion mais abundante no citoplasma e participa de processos essenciais como ativação enzimática, fotossíntese, transporte de assimilados e regulação estomática, e também, sob baixa disponibilidade, surgem sintomas típicos de deficiência, clorose marginal em folhas mais velhas, evoluindo para necrose (FURLANETTO et al., 2023; DIAS et al., 2019; LIMA et al., 2022).

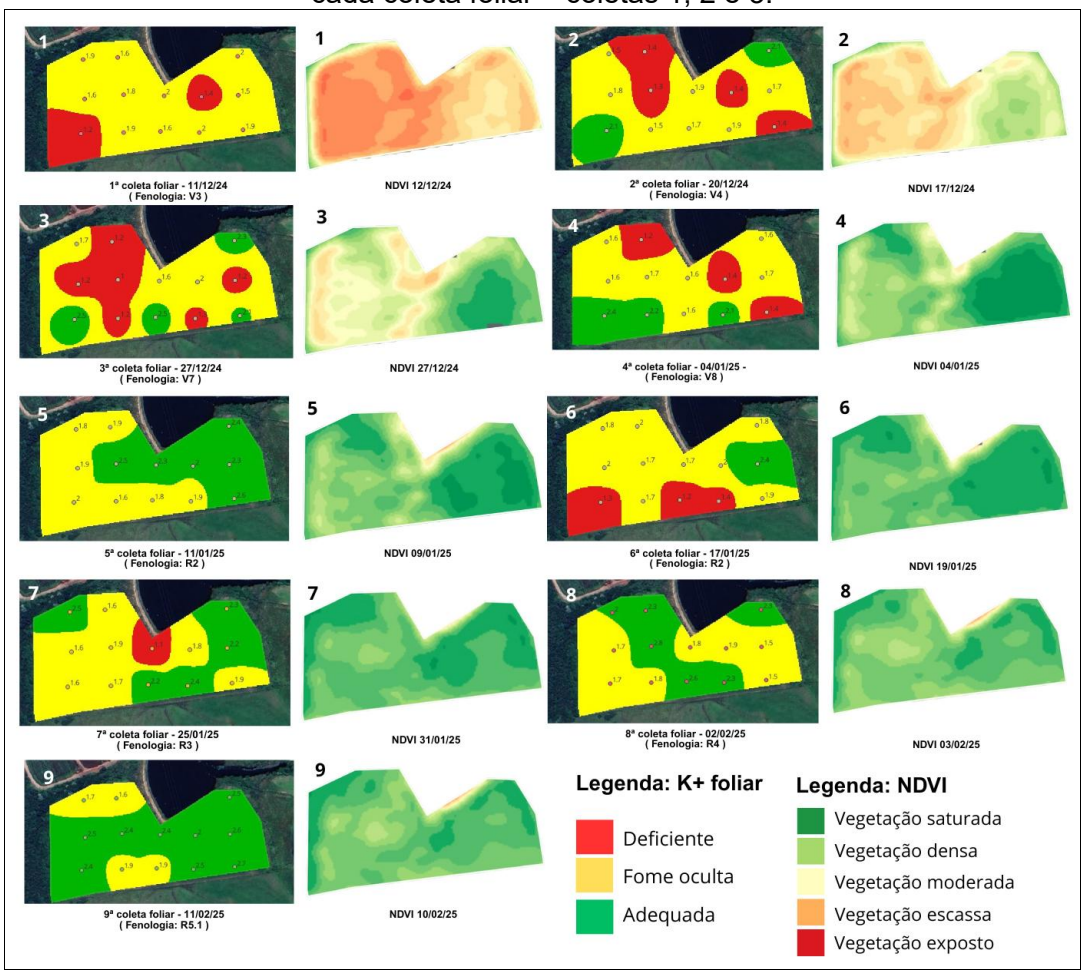
A aplicação de KCl a taxa fixa (200 kg ha⁻¹) realizada em 09/12/2024 (V3) não se refletiu imediatamente nos diagnósticos, mas a melhora mais consistente dos teores foi observada somente em 11/01/2025 (R2), o que sugere um intervalo necessário para absorção, redistribuição no dossel e manifestação no trifólio diagnóstico.

Do ponto de vista edafoclimático, a dinâmica do K no sistema solo–água-planta-atmosfera pode ser afetada tanto por difusão (principal mecanismo de suprimento radicular) quanto por fluxo de massa. Em condições de verão mais quente e precipitações abaixo da média, cenário reportado para o período com totais inferiores a 250 mm na região, contra uma média histórica de 400–500 mm (BRASIL, 2025), a restrição hídrica tende a reduzir o fluxo difusivo e a atividade transpiratória, limitando a absorção, ainda que a lixiviação de K não seja o principal risco em anos secos (BOSCHIERO, 2023). Esse contexto ajuda a explicar a persistência de áreas com fome oculta/deficiência nos primeiros levantamentos, apesar do suprimento via adubação.

No tocante ao sensoriamento remoto, o NDVI capturou a evolução do vigor do dossel, permitindo distinguir zonas de vegetação escassa/solo exposto, moderada e densa, conforme as reclassificações adotadas. A literatura aponta que a detecção de alterações nutricionais por NDVI é, em geral, mais factível no período vegetativo, quando o índice ainda não está saturado pelo fechamento do dossel (SILVA et al., 2016; LIMA et al., 2017).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 5 - Mapas de diagnóstico de K foliar e mapas de NDVI em datas próximas para cada coleta foliar – coletas 1, 2 e 3.



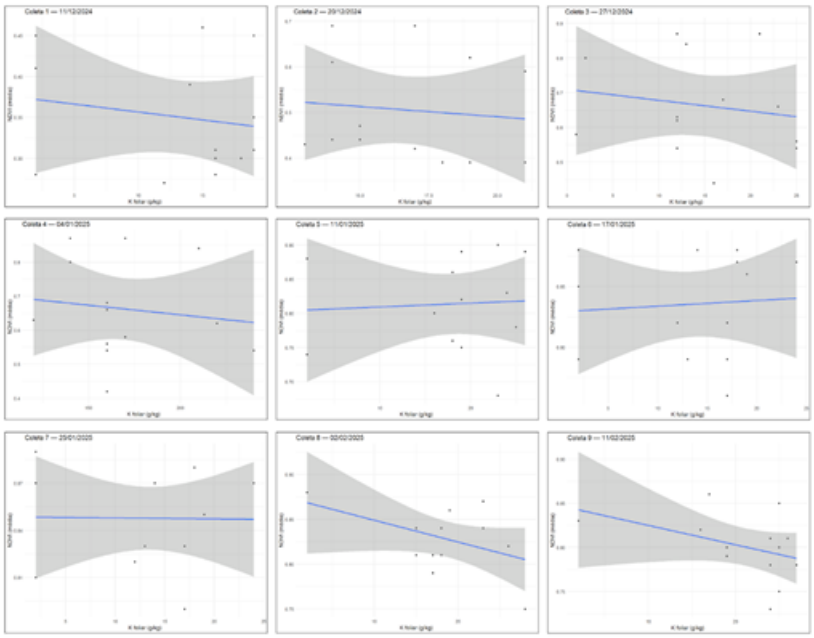
Fonte: Autores (2025)

Os resultados seguem essa expectativa apenas parcialmente, embora mapas iniciais mostrem coincidência entre NDVI baixo e teores de K^+ reduzidos em algumas áreas, a análise estatística por data revelou associações fracas e não significativas entre K foliar e NDVI ao longo do ciclo. No período vegetativo (V3–V8 – datas 11/12/2024 e 04/01/2025), os coeficientes foram pequenos e predominantemente negativos (Figura 6), em R2 (11/01/2025) houve leve positivação e, nos estádios R3–R5.1 (25/01/2025 e 11/02/2025 respectivamente), a tendência voltou a ser negativa, com maior magnitude, porém ainda sem significância no nível de 5% (n = 13 por data). Esse padrão é biologicamente plausível, pois: além da saturação espectral do NDVI em dosséis fechados, o K é altamente móvel e, no estádio reprodutivo, ocorre remobilização das folhas para vagens e sementes, em plantas mais vigorosas (NDVI elevado) podem, no momento da amostragem, exibir concentrações foliares menores de K por remobilização e/ou efeito de diluição da biomassa, enfraquecendo ou invertendo a associação pontual com o índice.

Segundo INMET (2025), ainda sobre a discussão acima, podemos destacar que no Rio Grande do Sul as chuvas foram escassas em janeiro de 2025, resultando em baixos volumes, principalmente na segunda metade do mês. Este cenário veio causando restrição hídrica para as culturas de primeira safra. Bem como também conforme INMET (2025) a situação semelhante ocorreu em fevereiro, totalizando um

acumulado pluviométrico abaixo de 120 mm, ocorrendo assim uma redução do armazenamento hídrico no solo, que se encontrava na fase de enchimento de grãos, o que também se sugere como uma das justificativas para estes dados encontrados sobre menores índices de K e a evolução dos índices de NDVI.

Figura 6 - Relação entre K foliar e NDVI por data de coleta: dispersões com ajuste linear (IC95%)



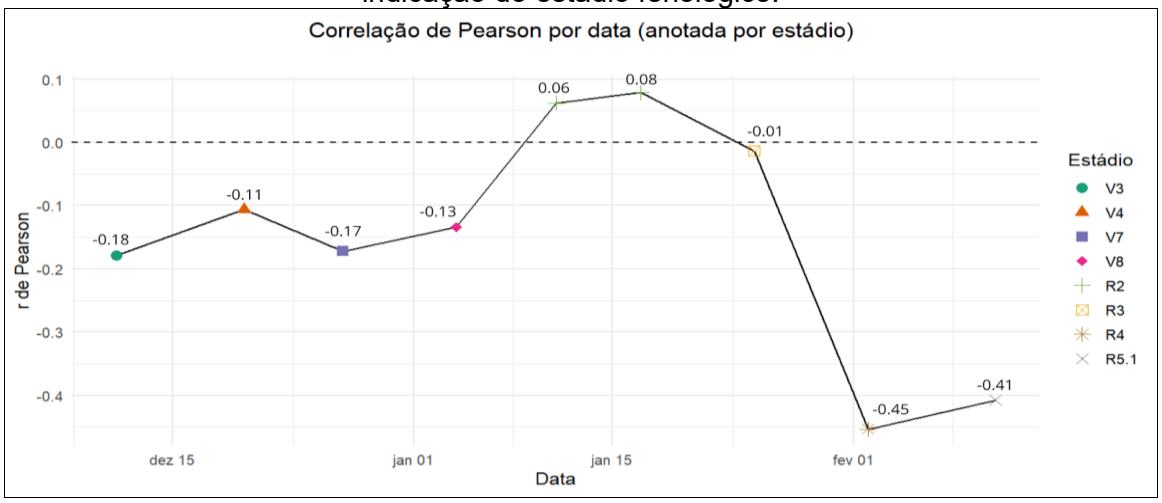
Fonte: Autores (2025)

A diagnose rápida com sensor iônico mostrou-se operacionalmente eficiente, pois elimina a defasagem entre amostragem, processamento laboratorial e retorno do resultado, favorecendo decisões em tempo hábil (OLIVEIRA et al., 2019). Entretanto, os achados reforçam que o NDVI, isoladamente, não é um indicador indireto confiável do estado de K em escala intratalhão, sua utilidade reside em mapear variabilidade e priorizar inspeções, devendo ser combinado com análises foliares (ou seiva) e informações de solo. Para melhorar a sensibilidade do monitoramento nutricional por sensoriamento, recomenda-se alinhar temporalmente imagem e coleta (±2 a 3 dias), ampliar o tamanho amostral por data e considerar índices menos saturantes (p. ex., NDRE/Red-edge ou EVI), além de modelagens que estratifiquem por estádio fenológico e incorporem rendimento como variável-resposta. Uma alternativa que pode ser testada é a utilização de imagens da constelação PlanetScope®, cujos sensores geram imagens diárias com 3 metros de resolução espacial nas bandas espectrais do visível e do infravermelho próximo. Em desvantagem, a utilização dessas imagens só pode ser acessada de forma gratuita após 30 dias de sua geração. Neste caso, há necessidade de adequar o planejamento metodológico para a realização de coletas *in situ*.

Em síntese, houve melhora temporal dos teores foliares de K após a adubação, evidenciada nos mapas e na classificação diagnóstica; contudo, não se confirmou correlação linear significativa entre K foliar e NDVI nas datas avaliadas. Essa combinação de resultados é consistente com a fisiologia do K na soja, com as limitações espectrais do NDVI e com as condições ambientais do período e orienta o uso complementar de sensoriamento e diagnose foliar no manejo potássico.

Os resultados indicaram correlações predominantemente fracas ao longo do ciclo (Figura 7). No período vegetativo (V3–V8 em 11/12/2024 e 04/01/2025, respectivamente) os coeficientes foram pequenos e ligeiramente negativos (aproximadamente −0,18 a −0,13), enquanto no início do reprodutivo (R2 – 17/01/2025) observaram-se valores discretamente positivos (≈ 0,06–0,08). Em R3–R5.1 (entre 25/01/2025 e 11/02/2025), já em fevereiro, as correlações voltaram a ser negativas e aumentaram em magnitude (≈ −0,45 a −0,41). Em todas as datas os intervalos de confiança cruzaram zero e os p-valores foram não significativos, o que indica ausência de evidência estatística de correlação linear entre o NDVI e o teor foliar de K nas condições avaliadas. Os padrões visuais dos gráficos de dispersão são coerentes com esses achados, mostrando nuvens pouco estruturadas e retas de regressão de pequena inclinação.

Figura 7 - Correlação de Pearson (K foliar × NDVI) ao longo das coletas, com indicação do estádio fenológico.



Fonte: Autores (2025)

Do ponto de vista agronômico, tais resultados são plausíveis. O NDVI capta sobretudo turgência biomassa do dossel, atributos fortemente influenciados por nitrogênio, arquitetura e cobertura do solo. Quando o K não está estritamente limitante, variações no seu teor foliar tendem a se refletir pouco no NDVI durante o vegetativo. Além disso, em dosséis fechados o NDVI sofre saturação espectral, reduzindo sensibilidade a diferenças fisiológicas. Já nos estádios reprodutivos, a mobilidade do K favorece a remobilização das folhas para vagens e sementes, plantas mais vigorosas (maior NDVI) podem remobilizar mais K e, no momento da coleta, apresentar concentrações foliares relativamente menores, o que explica a tendência negativa observada em R4–R5.1 (entre 02/02/2025 e 11/02/2025). É provável também a atuação de fatores de distorção, tais como: água, N, sanidade, variação edáfica, que afetam o NDVI e atenuam a associação com K. Por fim, o tamanho amostral por data (n = 13) limita o poder para detectar efeitos de magnitude moderada.

4 CONCLUSÃO

Em termos operacionais, conclui-se que o NDVI, isoladamente, não se mostrou um indicador confiável do estado nutricional de K na folha neste talhão e safra. O

ISBN 978-65-990392-6-3

índice segue útil para mapear variabilidade espacial e priorizar inspeções, mas decisões nutricionais de K devem continuar apoiadas em análises foliares e de solo na janela recomendada. Estudos futuros podem aumentar o número de pontos por data, reduzir o descompasso temporal entre imagem e coleta, empregar índices menos sujeitos à saturação (p.ex., NDRE/*Red-edge* ou EVI) e modelar conjuntamente estádios fenológicos ou mesmo produtividade, a fim de esclarecer melhor a relação K–sensoriamento.

AGRADECIMENTOS

Ao Colégio Politécnico – UFSM, projeto Advanced Farm 360° em proporcionar acesso a área de pesquisa, a empresa Zeit pela disponibilidade de suas tecnologias para desenvolvimento deste trabalho, a plataforma digital *EOS DATA Monitoring* pela disponibilidade dos arquivos em *shapefile* e índices NDVI utilizados no desenvolvimento dos mapas de diagnóstico, aos colegas e professores co-autores pela contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BATISTA, M. A. et al. **50 anos do NDVI:** desmistificando o índice e ponderando sua utilização para o monitoramento da soja na era digital. Londrina: Embrapa Soja, 2024. 83 p. (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937; n. 463).

BOSCHIERO, B. N. **Aplicação de cloreto de potássio a lanço:** 5 requisitos que precisam ser atendidos. AGROADVANCE, 6 de abr. de 2023. Disponível em: https://agroadvance.com.br/blog-aplicacao-de-cloreto-de-potassio-a-lanco/. Acesso em: 09/08/2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Verão 2024-2025 foi o sexto mais quente no Brasil desde 1961**. Gov.br, 24 mar. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/verao-2024-2025-foi-o-sexto-mais-quente-no-brasil-desde-1961. Acesso em: 19/08/2025.

BUENO, D. **A importância do potássio na cultura da soja**. Agrotécnico. Recuperado de https://agrotecnico.com.br/a-importancia-do-potassio-na-cultura-da-soja/. Acesso em 27/07/2025

DIAS, A. S., et al. Gas exchanges, quantum yield and photosynthetic pigments of West indian cherry under salt stress and potassium fertilization. **Revista Caatinga**, 32 (2), 429–439. 2019.https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n214rc.

FURLANETTO, R. H. et al. Machine learning as a tool to predict potassium concentration in soybean leaf using hyperspectral data. **Precision Agriculture**, v. 24, p. 2266. 2023. DOI: 10.1007/s11119-023-10040-w.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (Brasil). **Boletim Agroclimatológico**. v. 60, n. 02, fev. 2025. Brasília: INMET, 2025. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/. Acesso em: 19/09/2025.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (Brasil). **Boletim Agroclimatológico**. v. 60, n. 03, mar. 2025. Brasília: INMET, 2025. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/. Acesso em: 19/09/2025

LIMA, G. S., et al. Saline water irrigation strategies and potassium fertilization on physiology and fruit production of yellow passion fruit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 26 (3), 180–189. 2022. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n3p180-189.

LIMA, D. R. M. et al. Uso de NDVI e SAVI para Caracterização da Cobertura da Terra e Análise Temporal em Imagens RapidEye. **Revista Espacios**, v. 38, n. 36, p. 7, 2017.

OLIVEIRA JUNIOR, A. de. et al **FAST-K:** teste rápido para determinação da concentração foliar de potássio (K) em condições de campo na cultura da soja. Londrina: Embrapa Soja, 2019. Folder.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Planejamento, Governança e Gestão. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul** (6. ed.). SPGG. 2021.

SHAHEB, M. R.; SARKER, A.; SHEARER, S. A. **Precision Agriculture for Sustainable Soil and Crop Management**. Soil Science - Emerging Technologies, Global Perspectives and Applications. IntechOpen. 3p. 2022.

SILVA, A. L. C. et al. Análise do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) na Bacia do Rio Pajeú, PE. In: I Simpósio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: Integrando conhecimentos científicos em defesa do Velho Chico. Recife: UFPE, **Anais ...**, 2016.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 27

EFEITOS DE INOCULAÇÕES E REGIMES HÍDRICOS NA PERFORMANCE DA CULTURA DA SOJA

Effects of different inoculations and water regimes on soybean crop performance

Rafael Augusto Karsburg[1]; Camilla da Silva Rodrigues[2]; Milena Ferreira da Silva Zühl[1]; Érika Batista Feron[1]; Raissa Wolffenbuttel[1]; Érika Nunes Macedo[1]; Lorenzo Isasmendi da Silveira[1]; Alberto Eduardo Knies[3]

[1] Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs), Rua Sete de Setembro, nº. 1040, Centro, CEP 96508-010, Cachoeira do Sul - RS, Brasil, e-mail para contato <rafael-karsburg@uergs.edu.br>;
[2] Eng. Agrônoma, egressa da Uergs Unidade em Cachoeira do Sul - RS, <camilla-rodrigues@uergs.edu.br>.
[3] Eng. Agr., Me. em Ciência do Solo, Dr. em Eng. Agrícola, prof. Adjunto da Uergs Unidade em Cachoeira do Sul - RS, alberto-knies@uergs.edu.br.

RESUMO

O Brasil é o maior produtor mundial de soja, sendo a inoculação das sementes e a disponibilidade de água no solo essenciais para a busca de altas produtividades. Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar as respostas da cultura da soja à diferentes inoculações e coinoculações das sementes associadas à diferentes regimes hídricos. Foi conduzido um experimento à campo, bifatorial, sendo o fator A composto por 5 inoculações (testemunha/sem inoculação, inoculação com *Bradyrhizobium japonicum,* com *Azospirillum brasiliense*, com *Bacillus subtilis* + *Bacillus amyloliquefaciens* + *Trichoderma harzianum* e, inoculação com todos os microrganismos) e, o fator B foi composto por 2 regimes hídricos (sequeiro e com irrigação). A inoculação das sementes influenciou significativamente o acamamento, a produtividade de grãos e a eficiência do uso da água, enquanto que, o fator regime hídrico influenciou todas as variáveis avaliadas. Assim, a utilização da coinoculação associada a irrigação destacaram-se como ferramentas importantes para a busca de maiores produtividades e sustentabilidade da cultura da soja.
Palavras-chave: Bioinsumos. Tratamento de sementes. Coinoculação.

ABSTRACT

Brazil is the world's largest soybean producer, and seed inoculation and water availability are essential for achieving high yields. Therefore, this study aimed to evaluate the responses of soybean crops to different seed inoculations and coinoculations associated with different water regimes. A bifactorial field experiment was conducted, with factor A consisting of five inoculations (control/no inoculation, inoculation with *Bradyrhizobium japonicum*, inoculation with *Azospirillum brasiliense*, inoculation with *Bacillus subtilis* + *Bacillus amyloliquefaciens* + *Trichoderma harzianum,* and inoculation with all microorganisms). Factor B consisted of two water regimes (rainfed and supervised). Seed inoculation affected lodging, grain yield, and water use efficiency, while the water regime factor affected all evaluated variables. Thus, the use of co-inoculation combined with active ingredients has emerged as an important tool for achieving higher productivity and sustainability in soybean crops.
Keywords: Bioinputs. Seed treatment. Co-inoculation.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glicine max* L. Merrill) está disseminada por países de todos os continentes, mas a maior parte da produção concentra-se nas Américas do Norte e do Sul, onde a produtividade alcança os melhores desempenhos mundiais. A soja só passou a ganhar maior importância na agricultura nacional a partir da década de 1970, quando se verificou a continuidade de sua expansão no Sul e no Sudeste e teve início o cultivo nas áreas de cerrados da região Centro-Oeste (SIQUEIRA, 2004).

Um bom desempenho da cultura da soja depende diretamente de condições climáticas favoráveis, principalmente da disponibilidade de água durante o seu ciclo. Nesse contexto, a irrigação desempenha um papel fundamental para garantir a produtividade da lavoura. Durante o ciclo da soja, existem períodos críticos em que a planta é muito sensível à falta de água, como a fase de floração e enchimento de grãos. A maioria da soja cultivada no estado é em lavouras de sequeiro e apresenta grande variabilidade interanual, pois a precipitação pluvial é a principal fonte de água para os agrossistemas gaúchos (ALBERTO et al., 2006).

Segundo Bonato (2000), secas durante o período vegetativo reduzem o tamanho da planta, diminuem a área foliar e o rendimento dos grãos, enfatizando que o déficit hídrico neste período resulta em plantas de baixa estatura, raquíticas, com folhas pequenas e entrenós curtos. Baranzzeli (2023) cita que, durante um experimento realizado em Cachoeira do Sul – RS, entre 2018 a 2023, nos anos em que ocorram o fenômeno La Niña, foram registradas baixas quantidades e irregularidades na distribuição de chuvas, sendo necessário o uso de irrigação suplementar, principalmente para o ano agrícola 2022-23. A irrigação suplementar proporcionou aumento do número de vagens por planta, para todos os anos agrícolas com destaque para 2022-23 onde ocorreu um acréscimo de 30,66 vagens.

A cultura da soja no Brasil seria inviabilizada economicamente se os produtores tivessem que aplicar todo o nitrogênio necessário para suprir as demandas da planta (HUNGRIA et al., 2001). O nitrogênio (N), por ser um constituinte dos ácidos nucléicos e de proteínas, moléculas fundamentais para todos os processos biológicos é o nutriente requerido em maior quantidade pelas plantas. No caso da cultura da soja particularmente pelo teor elevado de proteínas nos grãos, a demanda em N é elevada, estimada em cerca de 80 kg de N para cada 1.000 kg de grãos produzidos. A soja pode obter esse N de quatro fontes: 1- o solo, principalmente pela decomposição da matéria orgânica; 2– a fixação não-biológica; 3- os fertilizantes nitrogenados; e 4- o processo de fixação biológica do nitrogênio atmosférico (N2) (HUNGRIA et al., 2007).

A inoculação das sementes de soja é uma prática indispensável para fornecer o N que a soja necessita através de uma simbiose. A bactéria inoculada (*Bradyrhizobium japonicum* e *Bradyrhizobium elkanii*) nas sementes infecta as raízes da soja, via pelos radiculares, formando os nódulos e, no seu interior, ocorre o processo de Fixação Biológica do Nitrogênio (FBN) que a soja necessita. A FBN pode, dependendo de sua eficiência, fornece todo o N que a soja necessita, e deve ser maximizada (HUNGRIA et al., 2007). O uso de inoculantes contendo estirpes de *Bradyrhizobium* spp. implica em expressiva economia anual em fertilizantes nitrogenados. A quantidade de N fixada pela soja através da FBN equivale a até 300 kg N ha^{-1} e fornece até 94% das necessidades da cultura (ZUFFO et al., 2015).

As bactérias do gênero *Azospirillum* proporcionam efeitos benéficos às plantas, pela sua capacidade de estimular a produção de fitormônios em quantidades

expressivas, que resulta em crescimento das plantas. O uso de bactérias promotoras do crescimento de plantas, como o *Azospirillum*, que aumenta a eficiência do uso de fertilizantes, e a entrada de N através da FBN, representa uma estratégia economicamente viável, além dos benefícios ambientais associados com a redução no uso de fertilizantes (HUNGRIA, 2011). Desta forma, contribuem para satisfazer as exigências modernas da agricultura através da sustentabilidade econômica, social e ambiental (CHAPARRO et al., 2012).

As rizobactérias promotoras do crescimento de plantas (RPCP) colonizam as raízes de plantas e induzem um aumento no crescimento vegetal. Entre os mecanismos pelo qual RPCP podem exercer efeitos benéficos nas plantas estão a absorção de nutrientes, principalmente o fósforo, através da solubilização de fosfatos, síntese de fitohormônios tal como o ácido indol acético (AIA), fixação assimbiótica do nitrogênio (CONTRERAS-CORNEJO et al., 2016; ZEILINGER et al., 2016).

As bactérias do gênero *Bacillus* podem ser consideradas RPCP, pois apresentam habilidade de colonizar a rizosfera e promover o crescimento vegetal (KUNDAN et al., 2015), são essenciais para a reciclagem de nutrientes e possuem potencial como biofertilizantes para incremento da produtividade, além de poder beneficiar a planta durante períodos de estresses (KAVAMURA et al., 2013; BRAGA JUNIOR et al., 2018; DIAZ et al., 2019).

Os microrganismos do gênero *Bacillus subtilis* apresentam resposta no combate de doenças fúngicas e de nematoides (SALLAM et al., 2019; CUCU et al., 2020), pois possui relevantes mecanismos de ação, tais como: a síntese de substâncias antimicrobianas e a produção de compostos voláteis. Além disso, proporcionam crescimento de plantas através da produção de reguladores de crescimento como: auxina, citocinina e giberelina, melhorando assim, a qualidade nutricional das plantas através da disponibilidade de nutrientes essenciais, tais como: fósforo e nitrogênio (XU et al., 2016; ABDALLAH et al., 2018).

A espécie *Bacillus amyloliquefaciens* é uma bactéria capaz de formar endósporos resistentes a fatores ambientais adversos como alta radiação, temperaturas elevadas e stress hídrico. Essa espécie de bactérias também colonizam a rizosfera e tem grande capacidade de estímulos de produção de proteínas, aminoácidos, enzimas e também de metabólitos capazes de suprimir os patógenos da planta no solo e essas características favorecem o seu uso como biofertilizantes agrícolas (CHEN et al., 2007).

O fungo *Trichoderma* é utilizado em diferentes bioformulados que apresentam controle de patógenos de solo e ainda promovem o crescimento em diferentes culturas. Com isso, a utilização de *Trichoderma* aumentou e se tornou uma boa alternativa ao tratamento químico, para o controle de doenças de solo e sementes, principalmente para aqueles produtores que trabalham com agricultura orgânica e não podem usar produtos químicos (MACHADO, 2012).

A partir do exposto, este trabalho tem como objetivo avaliar as respostas da cultura da soja à diferentes inoculações e coinoculações das sementes associadas à diferentes regimes hídricos.

ISBN 978-65-990392-6-3

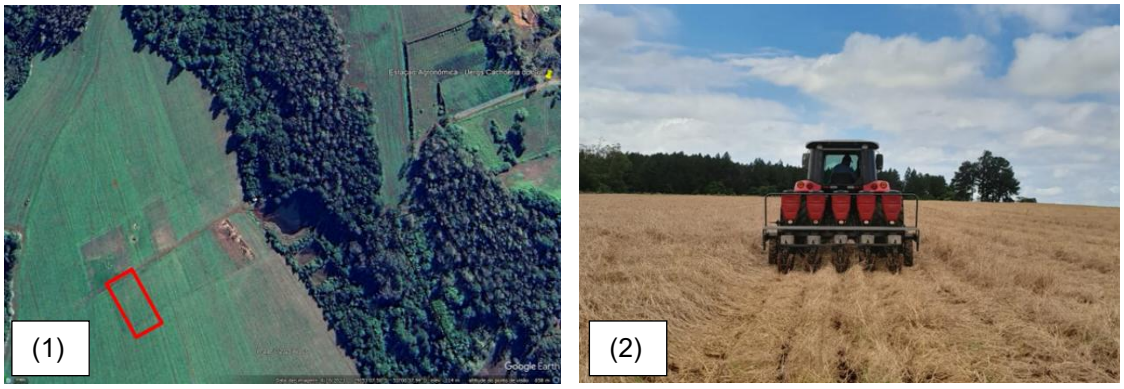
2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foi conduzido um experimento à campo, no ano agrícola 2024/2025, na Estação Agronômica da Uergs, localizada no município de Cachoeira do Sul-RS, na Região Central do Estado do Rio Grande do Sul, com latitude 29º 53'11,5'' S, longitude 53º 00' 44.2" W e altitude de 125 m (figura 1). O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2018) e o clima da região definido por Köppen como subtropical úmido.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, bifatorial, sendo o fator A composto por 5 inoculações (testemunha/sem inoculação, inoculação com *Bradyrhizobium japonicum,* inoculação com *Azospirillum brasiliense*, inoculação com *Bacillus subtilis, Bacillus amyloliquefaciens* e *Trichoderma harzianum* e, inoculação com todos os microrganismos juntos) e, o fator B foi comporto por 2 regimes hídricos (sequeiro e com irrigação suplementar). Cada parcela foi composta por 5 linhas de cultivo e 5 metros de comprimento.

A semeadura do experimento ocorreu no dia 22 de novembro de 2024 (figura 2), em plantio direto sob palhada composta por mix de aveia preta, centeio, azevém e nabo forrageiro, dessecada 30 dias antes da semeadura. Para a semeadura foi utilizando um conjunto composto por trator marca Massey Ferguson modelo MF 4275 acoplado a uma semeadora hidráulica marca Massey Ferguson modelo MF 205 (com 5 linhas). O espaçamento entre linhas foi de 0,50 cm, com densidade de 15 sementes por metro linear (300.000 sementes por hectare).

Figuras 1 e 2. Imagem aérea da área do experimento e semeadura das parcelas.



Fonte: Google Earth (2024) e autores (2024).

A cultivar de soja utilizada foi a Brasmax Zeus IPRO, com adubação de base de 280 Kg ha-1 de fertilizante formulado (04-40-08) aplicados de forma incorporadas junto à linha de semeadura. Aos 30 dias após a semeadura foi aplicado à lanço 150 Kg ha^{-1} de cloreto de potássio (KCl) em cobertura. Os demais tratos culturais, como o controle de plantas espontâneas, pragas e doenças seguiram as indicações de Martin et al. (2022).

A inoculação das sementes, conforme os tratamentos, foi realizada momentos antes da semeadura, utilizando-se formulações líquidas comerciais dos inoculantes da empresa Inocular Soluções Agrícolas Ltda, seguindo as doses recomendadas pelo fabricante.

ISBN 978-65-990392-6-3

A irrigação foi manejada com base na estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) calculada pelo método FAO - Penman-Monteith, utilizando dados meteorológicos como temperatura e umidade máxima e mínima do ar, velocidade do vento e radiação solar, obtidos da estação meteorológica automática instalada no Campus da UFSM Cachoeira do Sul, distante cerca de 20 Km do experimento.

Para o cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc) foram utilizados os valores de coeficientes de cultura (Kc) recomendados por Allen et al. (1998). Para os tratamentos irrigados, foi acionado o sistema de irrigação por aspersão convencional quando o armazenamento de água no solo chegou próximo de 50% do total de água disponível na camada de 0 a 35 cm de profundidade do perfil, aplicando-se uma lâmina fixa de 25 mm.

O sistema de irrigação utilizado foi o de aspersão convencional móvel, composto por uma moto bomba a combustão (gasolina) com 7 cv de potência, da marca Branco, tubulação principal com diâmetro de 75 mm e tubulação secundária de 50 mm e aspersores marca Agropolo modelo NY-30, instalados com espaçamento de 12x12 m, com taxa de aplicação de 12 mm h^{-1} (figura 3).

Figuras 6 e 4. Plantas de soja em pleno desenvolvimento e em irrigação suplementar (3) e avaliação da altura das plantas (4).



Fonte: Autores (2025).

Antes da realização da colheita foi avaliada a altura e o acamamento das plantas de cada parcela experimental. A altura das plantas foi medida com auxílio de uma trena, desde o solo até o último nó na haste principal da planta (figura 4) e, o acamamento foi avaliado na região central da parcela, estimando o percentual de plantas acamadas (inclinadas em mais de 50 %).

A colheita do experimento foi realizada no dia 11 de abril de 2025, em 2 linhas de cultivo por 2 m de comprimento (2 m²) na região central de cada parcela experimental. As plantas foram arrancadas manualmente e após trilhadas em um debulhador (figura 5) e as amostras acondicionadas em saquinhos de papel devidamente identificados (figura 6).

Os grãos das amostras foram limpos com auxílio de peneiras, depois medida a umidade com medidor apropriado e realizada sua pesagem. O peso obtido foi corrigido para umidade de 14% e extrapolado para um hectare. Dessa mesma amostra determinou-se a MMG (massa de mil grãos) a partir de 4 repetições de 100 grãos.

Também, a partir dos dados coletados, foi calculada a eficiência do uso da água (EUA) na cultura da soja, que representa a quantidade de soja produzida em

quilogramas para cada milímetro de água utilizada durante o ciclo da cultura (Kg mm^{-1}). Essa medida permite avaliar o quão eficiente a planta é em converter a água disponível em grãos. Foi calculada da seguinte forma (Eq. 1):

EUA (Kg mm^{-1}) = produção de soja (Kg ha^{-1}) / água utilizada (mm ha^{-1}) (Eq. 1)

Figuras 7 e 6. Debulha das plantas de soja (5) e amostras de grãos das parcelas do experimento (6).



Fonte: Autores (2025).

Foi considerada como água utilizada no regime de sequeiro somente a chuva acumulada durante o ciclo da cultura, enquanto que, no regime irrigado foi considerada a chuva e irrigação.

Os dados coletados foram analisados com auxílio do software Sisvar versão 5.1, sendo submetidos à análise de variância e, os efeitos estatisticamente significativos pelo teste F foram discriminados pelo teste de Tukey para a comparação de médias com 5% de probabilidade de erro.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O balanço hídrico resumido do experimento é apresentado na figura 7. A evapotranspiração da cultura foi estimada em 576 mm e, as chuvas somaram 356,00 mm ao longo do ciclo, estas foram insuficientes para manter o armazenamento de água no solo em níveis desejados, sendo necessário a irrigação suplementar total de 250,00 mm.

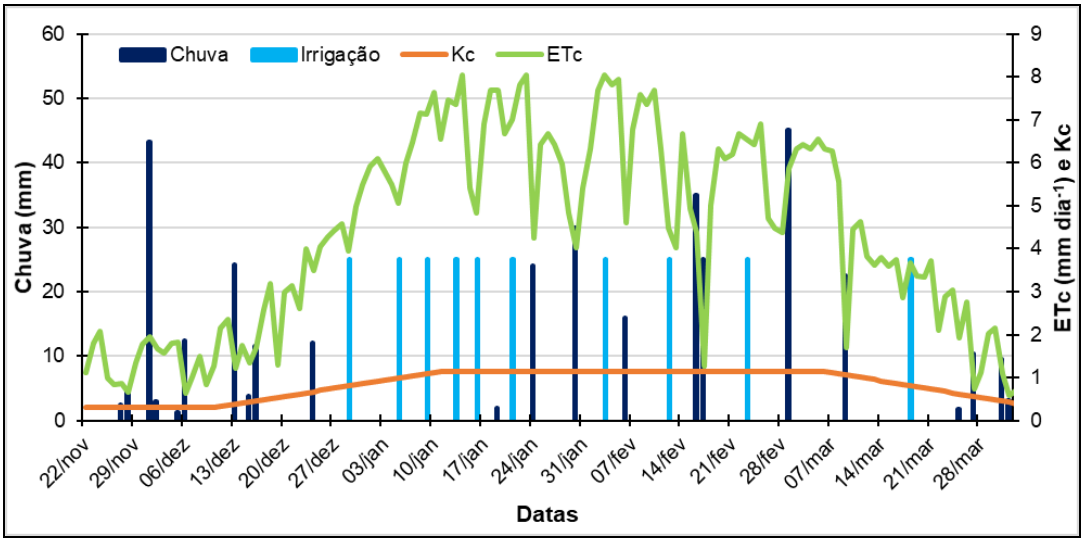
A safra foi marcada pela ocorrência do fenômeno La Niña especialmente entre o final de dezembro de 2024 até fevereiro de 2025. De acordo com o Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA, 2025), em dados analisados do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOOA), se vivenciou dois meses anômalos de La Niña, dezembro de 2024 e janeiro de 2025, onde houve uma tendência de Neutralidade, porém com um viés frio das águas do pacífico.

O fenômeno La Niña, embora com menor intensidade, impactou o verão 2024/25 no Rio Grande do Sul, com chuvas irregulares e tempo seco predominando entre períodos de instabilidade. A Região Sul teve um verão com chuva espaçada e dias secos alternados com episódios de instabilidade (INPE, 2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

A Emater/RS-Ascar anunciou a redução de 30,4% na estimativa original da produção de soja, na safra 2024/2025 em função da estiagem que atingiu o Rio Grande do Sul (Correio do Povo, 2025). Segundo Berlato e Fontana (1999), as alterações anuais da produtividade de soja no Sul do Brasil são função das oscilações no regime pluviométrico, o qual é fortemente influenciado pela ocorrência de fenômenos climáticos, como El Niño e La Niña.

Figura 8. Balanço hídrico do experimento com a cultura da soja.



Fonte: Autores (2025).

Na tabela 1 são apresentados os resultados dos indicadores estatísticos do experimento. Conforme pode-se observar, houve efeito de interação entre os fatores inoculação das sementes e regimes hídricos apenas na variável acamamento das plantas. O fator inoculação das sementes afetou significativamente as variáveis acamamento e produtividade de grãos e EUA, enquanto, o fator regime hídrico apresentou efeito significativo em todas as variáveis avaliadas.

Tabela 1. Valores de f calculado para as variáveis respostas obtidas em função dos fatores avaliados do experimento.

Fatores	Alt.	Acam.	Umid.	MMG	Prod.	EUA
Inoc.	0,78^{ns}	0,00*	0,25^{ns}	0,57^{ns}	0,00*	0,00*
Reg. hídr.	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*
Inoc. x Reg. hídr.	0,20^{ns}	0,00*	0,09^{ns}	0,57 ^{ns}	0,10^{ns}	0,14^{ns}
CV (%)	4,81	37,65	4,63	4,23	4,87	5,35
DMS	3,82	2,02	0,69	17,37	3,19	1,39

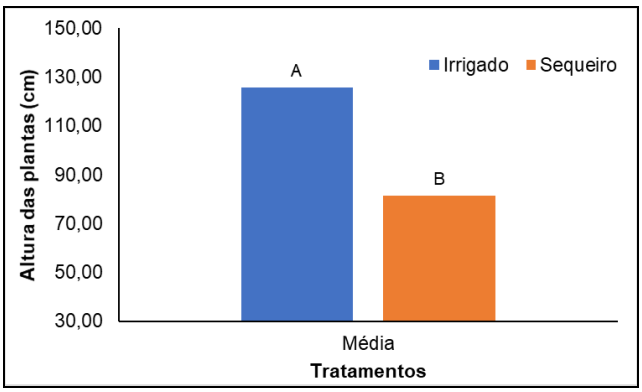
Onde: Inoc.: inoculações. Reg.Hídr: regimes hídricos. Inoc. x Reg.Hídr: Análise da interação dos fatores sobre a variável resposta. CV: coeficiente de variação (%). DMS: diferença mínima significativa. Alt.: altura das plantas; Acam.: acamamento das plantas. Umid.: umidade dos grãos na colheita. MMG: massa de mil grãos. Prod.: produtividade de grãos. EUA: eficiência de uso da água. *Efeito significativo, quando Pr<0,05. ^{ns} Efeito não significativo, quando Pr>0,05. Fonte: Autor (2025).

As plantas expostas ao regime hídrico irrigado obtiveram maiores valores de altura, chegando a atingir 130 cm (figura 8). Já no regime hídrico de sequeiro, as

ISBN 978-65-990392-6-3

plantas atingiram alturas menores, de no máximo 70 cm. Cabe salientar que nesta variável não houve efeito do fator inoculação das sementes, portanto são apresentados apenas os resultados médios em relação ao fator regime hídrico, o qual apresentou efeito significativo (conforme tabela 1).

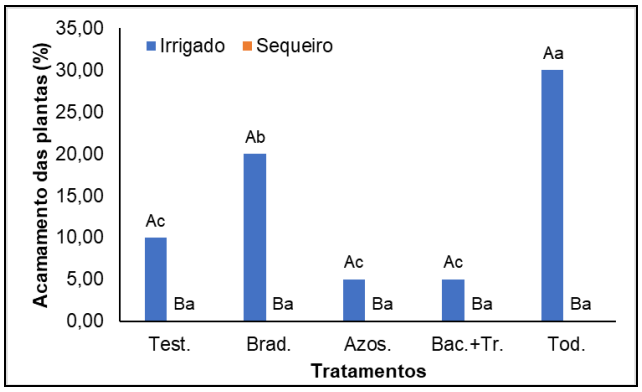
Figura 9. Variação da altura das plantas em função dos regimes hídricos.



*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05). Fonte: Autores (2025).

As plantas das parcelas que foram submetidos a irrigação suplementar obtiveram porcentagem de acamamento maior (figura 9). A soja tratada com *Bradyrhizobium japonicum* teve 20% de acamamento, enquanto a soja do experimento tratada com todos os inoculantes juntos teve 30% de acamamento. A umidade do solo é essencial para a sobrevivência da bactéria *Bradyrhizobium*, pois o estresse hídrico reduz a formação de nódulos e a síntese de leghemoglobina, reduzindo assim, o transporte de oxigênio dentro dos nódulos (SANTOS et al., 2012).

Figura 10. Acamamento das plantas de soja em função dos tratamentos avaliados.



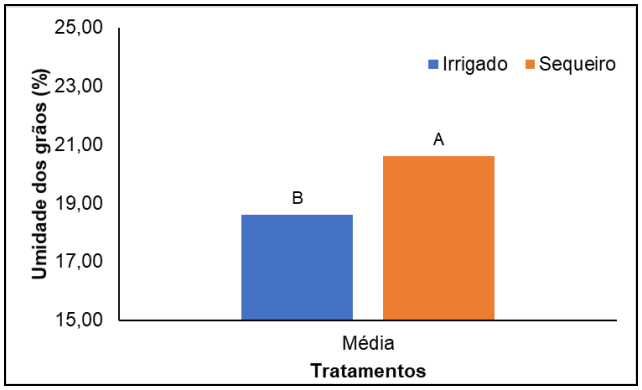
Onde: Test: Testemunha. Brad: *Bradyrhizobium japonicum.* Azos: *Azospirillum brasiliense.* Bac. + Tr: *Bacillus subtilis, Bacillus amyloliquefaciens, Trichoderma harzianum.* Tod: Todos juntos. *Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05), sendo que, as letras maiúsculas comparam as diferenças entre os regimes hídricos dentro de uma mesma inoculação, enquanto, as letras minúsculas comparam as diferenças entre as inoculações em um mesmo regime hídrico. Fonte: Autores (2025).

A utilização de bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP) amplia a produção de fitormônios, melhorando o crescimento radicular mitigando os efeitos do

estresse hídrico. Dentre os hormônios, o principal que atua em relação ao déficit hídrico é o ácido abscísico, visto que, reduz a transpiração estomática, podendo aumentar o alongamento da raiz primária e, assim, essas raízes podem chegar em novas fontes de água e de nutrientes (SHARIFI; RYU, 2017; SHARIFI; RYU, 2018).

A soja cultivada em sequeiro apresentou umidade de grãos mais elevada do que a cultivada com irrigação suplementar (figura 10). Embora a literatura discorde, pois Cruz (2023) comparou soja cultivada em sequeiro e irrigada, avaliando produtividade de grãos e massa de mil grãos, indicando que o sistema irrigado resultou em maior produtividade e massa de grãos, o que relaciona esse resultado com grãos formados corretamente e com menor umidade.

Figura 11. Umidade dos grãos de soja em função dos regimes hídricos.



*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05).
Fonte: Autores (2025).

A soja cultivada em sequeiro foi influenciada pelas chuvas irregulares e temperaturas altas, o que ocasionou em um alongamento no ciclo da cultura e retenção foliar, mantendo as folhas verdes por um período mais longo, principalmente pelo retorno das chuvas no final do ciclo da soja. Em condições de sequeiro os grãos também apresentam desuniformidade na maturação, ocasionando na colheita em estágios diferentes e consequentemente com maior teor de umidade

As plantas no regime de sequeiro apresentaram massa de mil grãos maior (figura 11). A massa dos grãos pode ser influenciada pela quantidade de água recebida. Neste caso, a soja submetida a irrigação apresentou MMG menor, pois sem sofrer déficit hídrico a planta produziu uma quantidade maior de grãos, mas com peso menor. Já a soja avaliada sob regime de sequeiro apresentou déficit hídrico durante seu ciclo e produziu uma quantidade menor de grãos, mas com uma massa de mil grãos maior.

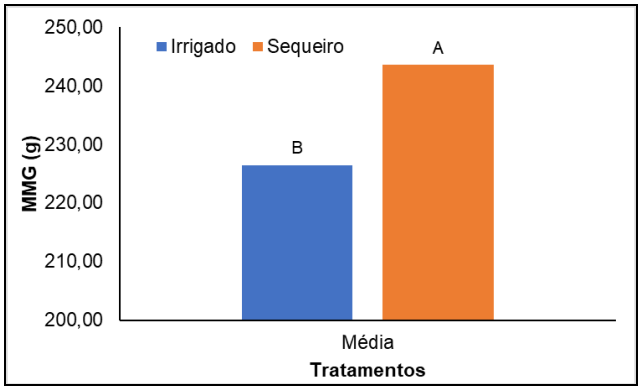
Segundo Kury (2022), em um experimento conduzido a campo na safra 2021/22, pode-se observar um aumento médio de 15 g no MMG de plantas conduzidas em sequeiro quando comparadas às plantas irrigadas, o que pode ser atribuído a elevada retenção foliar das plantas de sequeiro no final do ciclo, aliada ao retorno das chuvas no período de enchimento de grãos, podendo resultar em uma contribuição dessa área foliar verde na produção de fotoassimilados.

A produtividade de grãos da soja foi influenciada pelo uso das inoculações e regimes hídricos (figura 12). A cultura da soja em regime de sequeiro produziu em

ISBN 978-65-990392-6-3

média 68,81 sc ha^{-1} enquanto sob irrigação suplementar foram 102,00 sc ha^{-1}, um incremento médio de 33,18 sc ha^{-1} ou 48% com a utilização da irrigação suplementar. A coinoculação das sementes da soja com *Bradyrhizobium japonicum, Azospirillum brasiliense, Bacillus subtilis, Bacillus amyloliquefaciens* e *Trichoderma harzianum,* proporcionou uma produtividade de grãos de 110,08 sc ha^{-1} sob irrigação suplementar, enquanto a testemunha produziu 96,10 sc ha^{-1}, ou seja, um incremento de 13,98 sc ha^{-1} ou 14,5 % pela utilização de coinoculação sob irrigação suplementar. No regime hídrico de sequeiro, a produtividade de grãos da coinoculação foi 72,39 sc ha^{-1} e a testemunha foi 59,69 sc ha^{-1}, ou seja, um incremento de 12,70 sc ha^{-1} ou 21,27 % pela utilização de coinoculação sob sequeiro.

Figura 12. Massa de mil grãos (MMG) da soja em função dos regimes hídricos.

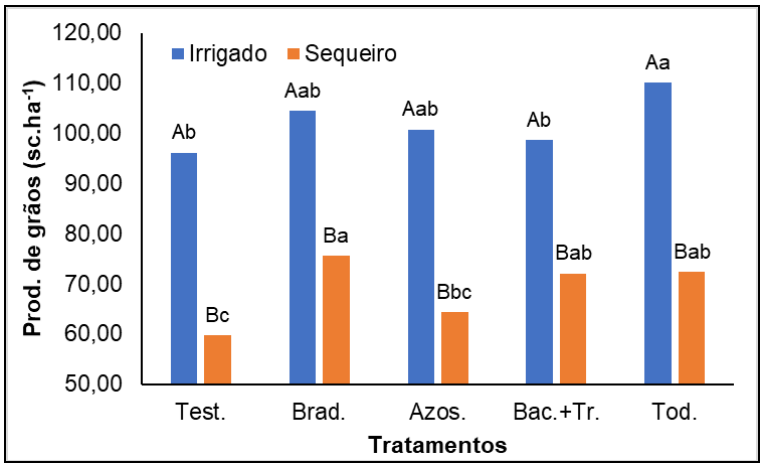


*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05).
Fonte: Autores (2025).

A associação desses microrganismos utilizados no tratamento das sementes de soja proporcionou o aumento da produtividade da cultura. A coinoculação com *Bradyrhizobium japonicum*, *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefaciens* e *Trichoderma harzianum* promoveu efeitos que potencializaram a produtividade dos grãos de soja. Esses microrganismos atuam de forma complementar, estimulando a nodulação, fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fósforo, produção de fitormônios como auxinas e giberelinas, além de induzirem resistência a estresses abióticos, como o déficit hídrico.

Pesquisas voltadas à essa temática foram realizadas pela Embrapa, onde se observou que a inoculação da soja com bactérias *Bradyhizobium spp*. oferece aumento de até 1,8 sacas por hectare (PRANDO et al., 2022). As bactérias do *gênero Bradyrhizobium spp*. têm potencial de fixação biológica de nitrogênio (FBN), por meio dos seus nódulos fixados nas raízes da família botânica das fabaceaes (IBÁÑEZ; WALL; FABRA, 2017). O aumento na produtividade observado no tratamento com coinoculação de cinco microorganismos pode ser atribuído à melhoria no desenvolvimento radicular, maior eficiência na absorção de nutrientes e água, e ao estímulo direto ao crescimento vegetal. Hungria et al. (2013) obtiveram aumento de produtividade de 16,1% com a coinoculação em soja na comparação a áreas não inoculadas, e 7,7% em comparação à áreas com plantas que receberam somente a inoculação com *Bradyrhizobium.*

Figura 13. Produtividade de grãos da cultura da soja em função dos tratamentos avaliados.



Onde: Test: Testemunha. Brad: *Bradyrhizobium japonicum.* Azos: *Azospirillum brasiliense.* Bac. + Tr: *Bacillus subtilis, Bacillus amyloliquefaciens, Trichoderma harzianum.* Tod: Todos juntos. *Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05), sendo que, as letras maiúsculas comparam as diferenças entre os regimes hídricos dentro de uma mesma inoculação, enquanto, as letras minúsculas comparam as diferenças entre as inoculações em um mesmo regime hídrico. Fonte: Autores (2025).

Segundo Meert et al. (2020), a inoculação com *Bradyrhizobium* e a coinoculação feitas na semente aumentam o número de vagens por planta e a produtividade. A estratégia de inocular a semente de soja com mais de um microrganismo, ou seja, coinoculação representa, assim, uma nova ferramenta biotecnológica para melhorar o rendimento da soja sem adicionar fertilizantes químicos nitrogenados, o que contribuirá para as práticas atuais de sustentabilidade na agricultura (HUNGRIA et al., 2015).

Além do controle biológico, alguns isolados de *Trichoderma* têm sido referidos como promotores do crescimento vegetal pela habilidade que possuem na solubilização de fosfatos e outros minerais (KAPRI; TEWARI, 2010; SILVA et al., 2011), disponibilizando-os para as plantas, bem como, pela produção de auxinas (VINALE et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2012), que segundo Taiz e Zeiger (2006) são substâncias que apresentam propriedades de induzir a elongação celular nos vegetais superiores.

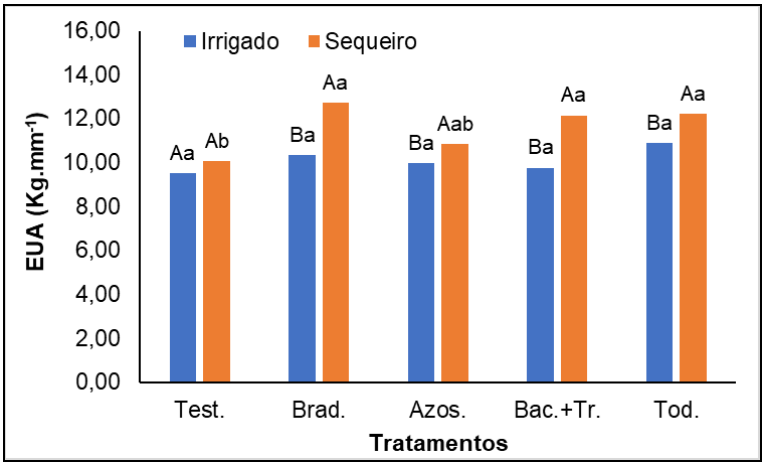
A EUA da cultura da soja foi afetada pelos regimes hídricos e pelas inoculações (figura 13). No regime hídrico irrigado, a EUA não apresentou diferenças significativas em função da utilização da inoculação, com valor médio de 10,10 Kg mm^{-1}. No regime hídrico de sequeiro, a EUA variou de 12,36 Kg mm^{-1} nos tratamentos com inoculação a 10,06 Kg mm^{-1} no tratamento testemunha/sem inoculação.

Se aproveitado com máxima eficiência, a cada um milímetro de água durante o ciclo de desenvolvimento da cultura é capaz de produzir 9,1 Kg de grãos de soja em condição potencial, ou cerca de 6 Kg de grãos de soja a nível de lavoura (ZANON et al., 2016). Em um experimento sobre a eficiência do uso da água da cultura da soja submetidas a diferentes níveis de reposição hídrica Almeida (2022), obteve grandes variações de valores médios de eficiência do uso da água em função dos níveis de

reposição hídrica, indicando que existe um potencial significativo para aumentar a eficiência dos sistemas de produção de soja irrigada.

De acordo com Kasim et al. (2013), a presença de BPCV pode aumentar a produção de genes relacionados ao estresse hídrico, melhorando assim a tolerância às condições de estresse. Segundo Santos et al. (2020), a presença de BPCV melhora a capacidade das plantas sob limitação hídrica de osmorregular através de maior acúmulo de solutos orgânicos em comparação com plantas não inoculadas sob estresse hídrico.

Figura 14. Eficiência de uso da água da cultura da soja em função dos tratamentos avaliados.



Onde: Test: Testemunha. Brad: *Bradyrhizobium japonicum.* Azos: *Azospirillum brasiliense.* Bac. + Tr: *Bacillus subtilis, Bacillus amyloliquefaciens, Trichoderma harzianum.* Tod: Todos juntos. *Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p<0,05$), sendo que, as letras maiúsculas comparam as diferenças entre os regimes hídricos dentro de uma mesma inoculação, enquanto, as letras minúsculas comparam as diferenças entre as inoculações em um mesmo regime hídrico. Fonte: Autores (2025).

4 CONCLUSÃO

Houve efeito de interação entre os fatores inoculação das sementes e regimes hídricos apenas na variável acamamento das plantas. O fator inoculação das sementes afetou significativamente as variáveis acamamento e produtividade de grãos, enquanto, o fator regime hídrico apresentou efeito significativo em todas as variáveis avaliadas.

A cultura da soja em regime de sequeiro produziu em média 68,81 sc ha^{-1} enquanto sob irrigação suplementar foram 102,00 sc ha^{-1}, um incremento médio de 33,18 sc ha^{-1} ou 48% com a utilização da irrigação suplementar.

A coinoculação das sementes da soja com *Bradyrhizobium japonicum, Azospirillum brasiliense, Bacillus subtilis, Bacillus amyloliquefaciens* e *Trichoderma harzianum,* resultou em produtividade de 110,08 sc ha^{-1} sob irrigação suplementar, enquanto a testemunha produziu 96,10 sc ha^{-1}, ou seja, um incremento de 13,98 sc ha^{-1} ou 14,5 % pela utilização de coinoculação sob irrigação suplementar. No regime hídrico de sequeiro, a produtividade de grãos da coinoculação foi 72,39 sc ha^{-1} e a

testemunha foi 59,69 sc ha^{-1}, ou seja, um incremento de 12,70 sc ha^{-1} ou 21,27 % pela utilização de coinoculação sob sequeiro.

A irrigação suplementar se mostrou uma alternativa importante para reduzir os prejuízos causados pela escassez de chuvas, principalmente em safras como a de 2024/2025, que foram influências pelo fenômeno La Niña. A adoção da inoculação e coinoculação com múltiplos microrganismos, aliada ao uso de irrigação suplementar, mostraram-se estratégias promissoras para aumentar a produtividade da soja em condições climáticas adversas.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a Universidade Estadual do Rio Grande do Sul pela disponibilização da Estação Agronômica para realização do experimento.

REFERÊNCIAS

ABDALLAH, R. et al Field suppression of Fusarium wilt and microbial population Shifts in tomato rhizosphere following soil treatment with two selected endophytic bacteria. **Eurasian Journal of Soil Science**, v. 8, p. 208-220, 2019.Acesso em: 22/08/2025.

ALBERTO, C. M. et al. Água no solo e rendimento do trigo, soja e milho associados ao El Niño Oscilação Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1067–1075, 2006.

ALMEIDA, Ailson Maciel de. **Eficiência do uso da água e resposta termal da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica**. 2022. 74 f. Tese (Doutorado em Ciências – Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.

ARAÚJO, F. F.; HUNGRIA, M. Nodulação e rendimento de soja co-infectada com Bacillus subtilis e Bradyrhizobium japonicum/elkanii. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 9, p. 1633–1643, 1999.

BARANZZELI, L. **Análise sobre a importância da irrigação suplementar para a cultura da soja em cinco anos agrícolas na região central do Rio Grande do Sul**. 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/33173>. Acesso em: 06 mai. 2025.

BENINTENDE, S. et al. Comparación entre coinoculación con Bradyrhizobium japonicum y Azospirillum brasilense e inoculación simple en el cultivo de soja. **Agriscientia, Córdoba**, v. 27, n. 2, p. 71–77, 2010.

BONATO, E. R. **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 245 p.

BRAGA JUNIOR, J. M. et al. Bacillus subtilis como RPCP em soja sob estresse hídrico. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 16, n. 2, p. 204–212, 2018.

CHAPARRO, J. M. et al. Genomic and genetic control of plant growth-promoting rhizobacteria traits. **Frontiers in Plant Science**, v. 3, p. 338, 2012.

CHEN, X. H., et al. Comparativeanalysisofthe complete genomesequenceoftheplantgrowth–promotingbacterium Bacillus amyloliquefaciens FZB42. **Naturebiotechnology**, 25(9), 2007.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos: 2024/2025 – 2ª estimativa**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2024.

CONTRERAS-CORNEJO, H. A. et al. Ecological functions of Trichoderma spp. and their secondary metabolites in the rhizosphere: interactions with plants. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 92, p. 1–17, 2016.

CUCU, M. A et al.; An assessment of the modulation of the population dynamics of pathogenic Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici in the tomato rhizosphere by means of the application of Bacillus subtilis QST 713, Trichoderma sp. TW2 and two composts. **Biological Control**, v. 142, p. 104158, 2020

DIAZ, J. et al. Effects of Bacillus subtilis on soybean under water stress. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 41, n. 8, p. 127–134, 2019.

DOS SANTOS, J. C. et al. Efeitos do estresse hídrico sobre a simbiose soja-Bradyrhizobium. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 5, p. 738–747, 2012.

FRANKE, L. B.; DORFMAN, D. **Irrigação da cultura da soja no Rio Grande do Sul**. Boletim Técnico da UFSM, n. 22, p. 1–20, 2000.

FULANET, A. Interações microbianas na rizosfera e seu impacto no crescimento vegetal. **Revista Ciência do Solo**, v. 47, p. e0200210, 2022.

HUNGRIA, M. et al. Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja. Embrapa Soja, Circular Técnica 35, Londrina, 2001.

HUNGRIA, M. et al. Soybean seed co-inoculation with Bradyrhizobium spp. and Azospirillum brasilense: A new biotechnological tool to improve yield and sustainability. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, n. 6, p. 811–817, 2015.

IBÁÑEZ, F.; WALL, L. G.; FABRA, A. Bradyrhizobium interactions and potential benefits to crops. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 101, n. 1, p. 1–11, 2017.

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). **Fenômeno La Niña se aproxima do fim e entra na fase neutral**. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/noticias/fen%C3%B4meno-la-ni%C3%B1a-se-aproxima-do-fim-e-entra-na-fase-neutra#:~:text=No%20entanto%2C%20apenas%20em%20dezembro,um%20enfraquecimento%20gradual%20do%20fen%C3%B4meno. Acesso em: 16 jun. 2025.

IRGA (Instituto Rio Grandense do Arroz). **Neutralidade no Oceano Pacífico está presente desde meados de fevereiro**. IRGA, 2025. Disponível em: https://irga.rs.gov.br/neutralidade-no-oceano-pacifico-esta-presente-desde-meados-de-fevereiro?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 04 jun. 2025.

KAPRI, A.; TEWARI, L. Solubilization of insoluble phosphate by Trichoderma spp. Brazilian **Journal of Microbiology**, v. 41, p. 792–798, 2010.

KASIM, W.A. et al. Control of Drought Stress in Wheat Using PlantGrowthPromoting Bacteria. **Journal of Plant Growth Regulation**, v.32, n.1, p.122130, 2013.

KAVAMURA, V. N. et al. Screening of Brazilian cacti rhizobacteria for plant growth promotion under drought. **Microbiological Research**, v. 168, n. 4, p. 183–191, 2013.

KUNDAN, R. et al. Plant growth promoting rhizobacteria: mechanism and current prospective. **Journal of Fertilizers and Pesticides**, v. 6, n. 2, p. 1–9, 2015.

KURY, Alexandre. **Produtividade de cultivares de soja com e sem irrigação suplementar na safra 2021/2022 em Cachoeira do Sul-RS**. Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, campus Cachoeira do Sul, RS, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/27907/Kury_Alexandre_Gon%c3% a7 alves_2022_TCC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 22 jun. 2025.

KUSS, R. C. R. **Populações de plantas e estratégias de irrigação na cultura da soja**. 2006. 81f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Campus Cachoeira do Sul, RS. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/27907/Kury_Alexandre_Gon%c3%a7alves_2022_TCC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 21 jun. 2025.

MACHADO, D. F. M. et al. Trichoderma no Brasil: o fungo e bioagente. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 35, n. 1, p. 274–288, 2012.

MARTIN, T. N. et al. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, safras 2022/2023 e 2023/2024**. Santa Maria: Editora GR, 2022.

MEERT, L. et al. Diferentes inoculantes, formas de inoculação e seus efeitos nas características agronômicas da soja. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 10, p. e2969108499, 2020.

NOGUEIRA, M. A. et al. **Ações de transferência de tecnologia em inoculação/coinoculação com Bradyrhizobium e Azospirillum na cultura da soja na safra 2017/2018 no Paraná**. Circular Técnica 143, Embrapa Soja, 2018.

OLIVEIRA, M. F. et al. Efeito de Trichoderma harzianum na promoção de crescimento e produção de soja. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 7, n. 2, p. 68–75, 2012.

PRANDO, A. M. et al. **Coinoculação da soja com Bradyrhizobium e Azospirillum na safra 2020/2021 no Paraná**. Embrapa Soja, Circular Técnica 181, 2022. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1144304/1/CIRCULARTECNICA-181-online.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2025.

SALLAM, N. M.; ERAKY, A. M.; SALLAM, A. Effect of Trichoderma spp. on Fusarium wilt disease of tomato. **Molecular Biology Reports**, v. 46, p. 4463-4470, (2019).

SANTOS, L. C. **Produção de milho sob influência de produtos atenuantes do estresse hídrico**. 2020. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, Paraíba, Brasil, 2020.

SHARIFI, R.; RYU, C. M. Biostimulant activity of volatile organic compounds produced by bacterial plant growth-promoting rhizobacteria. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 234, 2018.

SHARIFI, R.; RYU, C. M. Sniffing bacterial volatile compounds for healthier plants. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 44, p. 88–97, 2017.

SILVA, J. R. et al. Influência de Trichoderma spp. no crescimento e produtividade de culturas agrícolas. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 7, n. 1, p. 45–52, 2011.

SIQUEIRA, J. O. Inoculação de leguminosas: situação atual e perspectivas. In: Simpósio sobre Fixação Biológica de Nitrogênio, 2004, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

VINALE, F. et al. Trichoderma secondary metabolites active on plants and fungal pathogens. **Open Mycology Journal**, v. 2, p. 37–49, 2008.

XU, S et al. biological control of gray mold and growth promotion of tomato using Bacillus spp. isolated from soil. **Tropical Plant Pathology**, v. 41, p. 169-176, 2016.

ZANON, A. J.; STRECK, N.A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, v. 108, p.1447-1454, 2016.

ZEILINGER, S. et al. Friends or foes? Emerging insights from fungal interactions with plants. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 40, n. 2, p. 182–207, 2016.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 28

MANEJO SÍTIO-ESPECÍFICO DE POPULAÇÃO DE PLANTAS DE MILHO EM DIFERENTES ZONAS DE MANEJO

Site-Specific Management of Corn Plant Population in Different Management Zones

Mathias Sasseti Klein[1]; José Luiz Balansin Finatto[1]; Gabriel Sasseti Klein[2]; Diego Alessio[3]

[1] Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Linha Sete de Setembro, s/n, CEP: 98400-000, Frederico Westphalen – RS, Brasil, mathias_klein26@outlook.com; jose.finatto@acad.ufsm.br
[2] Zootecnista, Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, 89815-630, Chapecó – SC, Brasil, gabrielsasseti@gmail.com
[3] Eng° Agrônomo Msc., Fazenda Banhado Verde, 89694-000, Faxinal dos Guedes – SC, Brasil, d.alessio@hotmail.com

RESUMO

A agricultura de precisão (AP), por meio da semeadura em taxa variável, possibilita o ajuste da população de plantas de acordo com a variabilidade espacial das lavouras, impactando a produtividade do milho. O objetivo deste trabalho foi avaliar o rendimento de grãos do híbrido P3016VYHR em diferentes densidades populacionais e zonas de manejo, em experimento conduzido no município de Faxinal dos Guedes-SC, na safra 2021/22. As zonas de manejo (alta, média e baixa) foram definidas a partir do histórico produtivo e de mapas de colheita do talhão. O delineamento de blocos ao acaso com dois fatores, composto por quatro densidades (55.000, 70.000, 85.000 e 100.000 plantas ha^{-1}) e três zonas, sob Latossolo Bruno. Observou-se que, na zona de alta produtividade, a densidade de 85.000 plantas ha^{-1} apresentou o maior rendimento de grãos, enquanto nas zonas média e baixa, a maior produtividade foi obtida com 55.000 plantas ha^{-1}.

Palavras-chave: Semeadura em taxa variável; Densidade de plantas; Mapas de produtividade.

ABSTRACT

Precision agriculture (PA), through variable rate seeding, enables the adjustment of plant population according to the spatial variability of fields, impacting corn yield. The objective of this work was to evaluate the grain yield of the hybrid P3016VYHR at different population densities and management zones, in an experiment conducted in the municipality of Faxinal dos Guedes, Santa Catarina state, during the 2021/22 crop season. The management zones (high, medium, and low) were defined based on the historical productivity and yield maps of the field. The experimental design was a randomized complete block design with a two-factor factorial arrangement, consisting of four densities (55,000, 70,000, 85,000, and 100,000 plants ha^{-1}) and three zones, on a Latossolo Bruno. It was observed that, in the high productivity zone, the density of 85,000 plants ha^{-1} resulted in the highest grain yield, while in the medium and low zones, the highest yield was obtained with 55,000 plants ha^{-1}.

Keywords: Variable Rate Seeding; Plant Density; Yield Maps.

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é o cereal mais cultivado no mundo, com origem no continente asiático e atualmente é cultivado em quase todos os continentes, devido a sua grande diversidade de genótipos que garantem adaptação em diferentes condições climáticas. Possui ampla utilização, principalmente na alimentação humana, animal e na indústria. Para o consumo humano, pode ser utilizado como grão, farinha, fubá, óleo e amido, sendo fonte de energia e nutrientes essenciais (SILVA et al., 2018). Na nutrição animal, é o principal ingrediente energético das rações, especialmente para aves e suínos, pela alta digestibilidade do amido (CRUZ et al., 2020). Na indústria, destaca-se na produção de derivados como xaropes, bioplásticos e principalmente etanol, considerado uma alternativa renovável aos combustíveis fósseis (FAO, 2021).

Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2025), na safra 2024/25 a área plantada de milho no mundo foi de 203,65 milhões de hectares, alcançando uma produção total de 1,22 bilhões de toneladas. China e Estados Unidos são os maiores produtores de milho, juntos somados, esses países são responsáveis por uma produção de 672,55 milhões de toneladas na safra 2025, que corresponde a aproximadamente 55% da produção mundial do grão.

O Brasil é o 3º maior produtor de milho do mundo, com uma produção de 132 milhões de toneladas na safra 2024 (USDA, 2025). Seu cultivo é realizado em três safras por ano agrícola, sendo a primeira safra ou safra de verão, cultivada de setembro a dezembro, a segunda safra, também conhecida como safrinha, de janeiro a abril e a terceira safra, na qual o plantio ocorre de abril a junho. Na safra 2024/25, a safrinha foi responsável pela maior parcela da produção nacional, com 104,53 milhões de toneladas que correspondem a 79,2%, já safra de verão correspondeu a 18,9% com produção de 24,91 milhões de toneladas e a terceira safra é estimada em 2,5 milhões de toneladas, equivalente a 1,9% da produção brasileira (CONAB, 2025).

Como abordagem tecnológica, a agricultura de precisão (AP) apresenta-se como alternativa promissora para a elevação da produtividade na cultura do milho, oferecendo múltiplos recursos aplicáveis no campo. Dentre esses recursos, os mapas de produtividade constituem uma ferramenta essencial para viabilizar a implementação progressiva das práticas inerentes à AP. Com a utilização de mapas de produtividade, torna-se viável avaliar a heterogeneidade espacial e temporal das lavouras (AMADO et al., 2007), o que possibilita a definição de zonas de produção, igualmente denominadas zonas de manejo ou sítios específicos (MOLIN, 2002).

A definição de zonas de manejo permite adequar estratégias agrícolas de acordo com as variações nas propriedades do solo (SANTI, 2007). A semeadura em taxa variável, uma das ferramentas associadas à agricultura de precisão, constitui estratégia eficiente para aumentar o potencial produtivo. Por meio dessa tecnologia, é possível adequar a população de plantas de acordo com as condições específicas da área, promovendo uso racional dos recursos e refletindo em ganhos de produtividade (ARGENTA; SILVA; SANGOI, 2001).

Entretanto, trabalhos sobre a utilização da taxa variável de semeadura para a cultura do milho com objetivo de adequar os arranjos populacionais em zonas de manejo ainda são escassos, sendo assim necessário a realização de novos trabalhos na área, tendo em vista o grande número de híbridos disponíveis no mercado. Diante do contexto apresentado, o objetivo do trabalho foi avaliar o rendimento de grãos

do híbrido P3016VYHR em diferentes densidades populacionais e zonas de manejo.

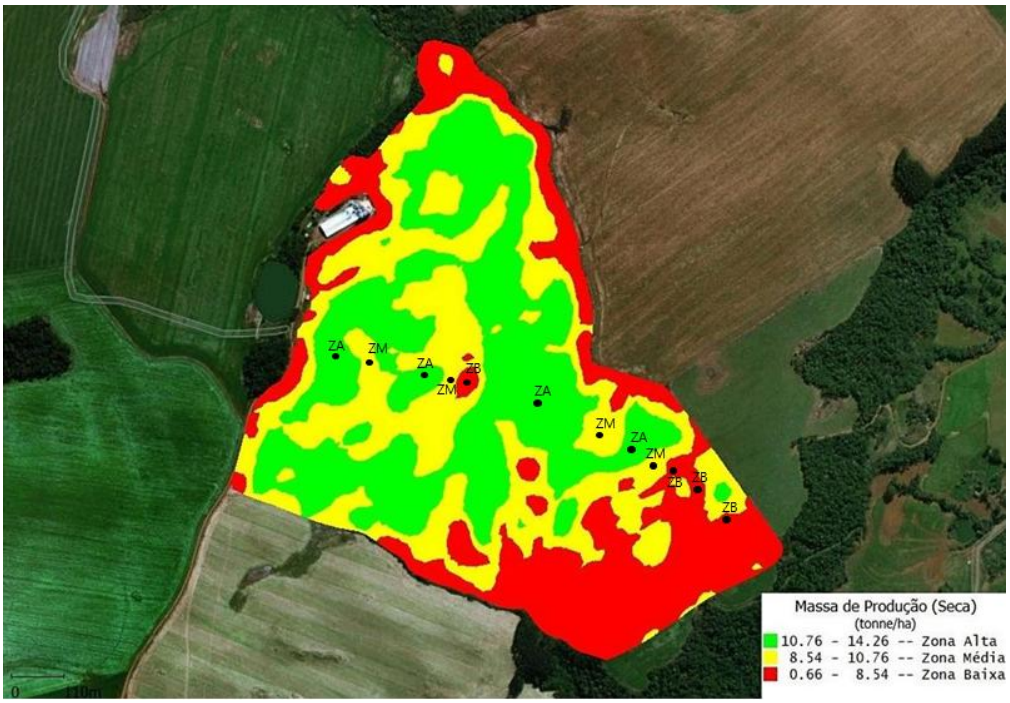
2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Fazenda Banhado Verde, localizada no interior do munícipio de Faxinal dos Guedes – SC, o solo presente na área é classificado como Latossolo Bruno (EMBRAPA, 2004), com relevo ondulado. O clima da região é classificado por *Köppen* como Cfb, clima temperado, sem estação seca e verão fresco.

O talhão onde o experimento foi realizado, o manejo realizado é de sistema plantio direto (SPD) a 45 anos e em sistema de agricultura regenerativa a aproximadamente 20 anos. A rotação de cultivos é realizada da seguinte forma: soja (*Glycine max* L.) e milho (*Zea mays* L.) no verão, trigo (*Triticum aestivum* L.) e plantas de cobertura como aveias (*Avena* spp.) centeio (*Secale cereale* L.), ervilhacas (*Vicia* spp.) entre outras, cultivadas em diferentes composições de coquetéis no outono e inverno. Os dados de precipitação pluviométrica foram coletados diariamente com o auxílio de um pluviômetro instalado próximo do local do experimento.

O experimento foi conduzido em delineamento experimental de blocos ao acaso e arranjados em esquema bifatorial (4x3), com quatro repetições, totalizando 12 tratamentos e 48 unidades experimentais. Os fatores em estudo foram os arranjos populacionais, que compuseram as faixas (55.000, 70.000, 85.000 e 100.000 plantas ha^{-1}), e as três zonas de manejo (zona de alta - ZA, zona de média - ZM e zona de baixa - ZB), com as parcelas georreferenciadas (Figura 01).

Figura 01 – Visão geral da distribuição das zonas de manejo e locais avaliados



Legenda: Verde – zona alta (ZA); Amarelo – zona média (ZM); Vermelho – zona baixa (ZB).
Fonte: Autores (2025).

As zonas de manejo foram delimitadas exclusivamente a partir de um mapa de produtividade de milho proveniente da safra 2017/18, levando em consideração o fato de que é possível observar e determinar a variabilidade espacial e temporal presente nas lavouras através de mapas de produtividade para a cultura do milho (AMADO et al. 2007), sendo submetido a uma filtragem de dados com o auxílio do software Map Filter 2.0 (MALDANER; MOLIN; SPEKKEN, 2021). Cabe ressaltar que a estratificação do talhão em zonas de manejo fundamentou-se estritamente no histórico de produtividade espacialmente explicitado, prescindindo de qualquer avaliação de atributos químicos ou físicos do solo como critério de classificação. Através da metodologia de quebras naturais (Jenks), que maximiza as diferenças de produtividade entre as zonas, os intervalos foram definidos da seguinte forma: Zona de Alta (ZA) para produtividade acima de 10,76 t ha^{-1}; Zona de Média (ZM) para produtividade de 8,54 a 10,76 t ha^{-1}; e Zona de Baixa (ZB) para produtividade de 0,66 até 8,54 t ha^{-1}.

O híbrido de milho utilizado foi o P3016VYHR da empresa PIONEER® (Corteva Agriscience) com finalidade para produção de grãos. A adubação foi realizada no momento da semeadura com a aplicação de 200 kg ha^{-1} de NPK da fórmula 08-30-15. Foi realizada também a inoculação de bactérias promotoras de crescimento e solubilizadoras de nutrientes (*Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus megaterium*) via sulco, com sistema de pulverização de jato dirigido acoplado a semeadora. Para a adubação de cobertura, foi utilizado 250 kg ha^{-1} de ureia com fórmula 45-00-00, dividido em 2 aplicações de 125 kg ha^{-1}, entre os estádios de V3 e V8.

Os dados de precipitação pluviométrica foram coletados diariamente com o auxílio de um pluviômetro instalado próximo do local do experimento.

A colheita foi realizada com auxílio de uma colhedora de grãos equipada com plataforma para colheita de milho de 24 linhas com espaçamento de 0,5 m. Além disso, a máquina utilizada era equipada com sensores de produtividade e umidade, e sistema de monitoramento de colheita *FieldView*™ Drive que coletou os dados gerados pela máquina e gerou um mapa de produtividade em tempo real através do aplicativo *FieldView*™ Cab.

O valor da produtividade de grãos foi corrigido para 13% de umidade através da fórmula:

$$Peso\ corrigido\ (13\%) = Peso\ bruto\ (g)\ x\ \frac{100 - Umidade\ amostrada}{100 - 13\ (Umidade\ desejada)}$$

Os dados coletados foram submetidos a análise de variância, utilizando o programa estatístico R®, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Para interpretação dos dados de rendimento de grãos, foi utilizado o teste de regressão através do software Excel.

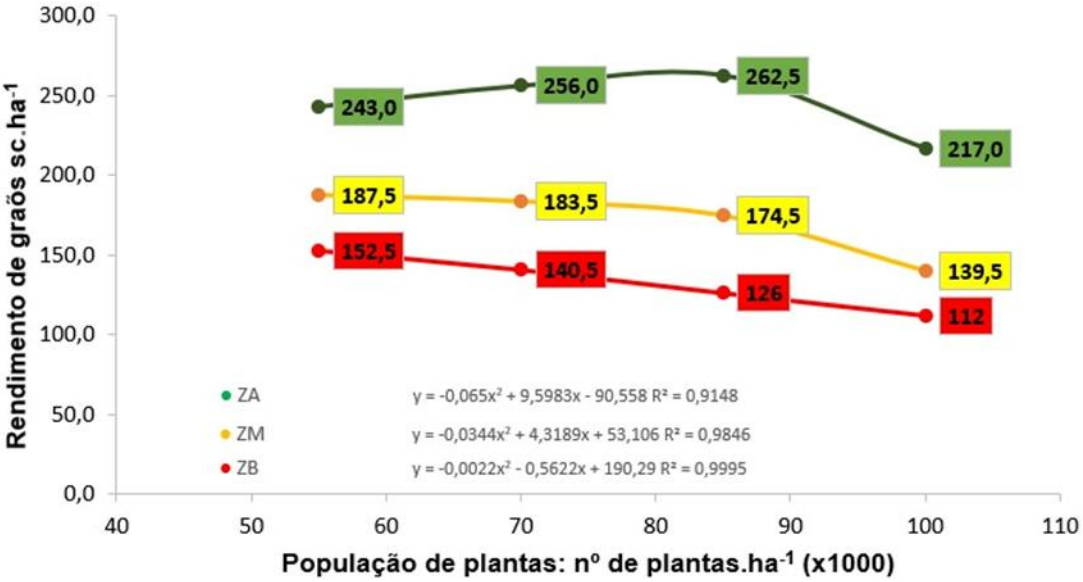
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para zonas de alto potencial produtivo (ZA), as densidades populacionais recomendadas pela Pioneer Sementes (70.000 e 85.000 plantas ha^{-1}) proporcionaram as maiores produtividades de grãos, não sendo observada diferença estatística entre

ISBN 978-65-990392-6-3

esses dois tratamentos. Embora, a população de 55.000 plantas ha⁻¹ tenha exibido valores superiores em componentes individuais de rendimento, como número de grãos por espiga, não resultou na máxima produtividade por unidade de área, reforçando a necessidade de definição de um arranjo populacional otimizado (MADDONI et al., 2001). Estes resultados alinham-se com os obtidos por Horbe (2012), que, em estudo conduzido no Rio Grande do Sul com o híbrido Pioneer 30F53 submetido a populações entre 40.000 e 80.000 plantas ha⁻¹, verificou que a população de 80.000 plantas ha⁻¹ promoveu o maior rendimento de grãos em zonas de alta produtividade. A Figura 2 apresenta o rendimento de grãos (sc. ha^{-1}) em função dos arranjos populacionais e zonas de manejo.

Figura 2 – Rendimento de grãos em função da população de plantas e zonas de manejo



Legenda: Verde: zona alta; Amarelo: zona média; Vermelho: zona baixa.
Fonte: Autores (2025).

Em condições favoráveis de disponibilidade hídrica, caracterizadas pela ocorrência de precipitações pluviométricas abundantes durante o período crítico para definição do rendimento, o aumento da densidade populacional pode resultar em respostas positivas de produtividade. Passos et al. (2019) demonstraram esse efeito em estudo conduzido no oeste do Paraná com o híbrido P3016VYHR, no qual a população de 100.000 plantas ha⁻¹ proporcionou o maior rendimento de grãos, seguida pela população de 85.000 plantas ha⁻¹ (valor máximo recomendado pela Pioneer Sementes). Estes resultados evidenciam que, na ausência de estresse hídrico, o incremento populacional além das recomendações técnicas pode explorar o potencial produtivo do híbrido, possivelmente em função da maior interceptação luminosa e aproveitamento dos recursos ambientais disponíveis.

Na zona de médio potencial produtivo (ZM), a população de 55.000 plantas ha⁻¹ apresentou rendimentos estatisticamente equivalentes aos obtidos nas

densidades recomendadas de 70.000 e 85.000 plantas ha^{-1}. Este resultado demonstra que, em anos com ocorrência de déficit hídrico, a redução populacional constitui uma estratégia de manejo viável para essas zonas, permitindo alcançar patamares de produtividade iguais ou superiores às recomendações técnicas convencionais. A manutenção do rendimento com menor densidade sugere uma mitigação da competição intraespecífica por água e nutrientes, otimizando a eficiência do uso de recursos limitantes nessas condições ambientais.

Para zonas de baixo potencial produtivo (ZB), as populações de 55.000 e 70.000 plantas ha^{-1} (menor densidade recomendada pela Pioneer Sementes) proporcionaram os maiores rendimentos de grãos. Este resultado é atribuído à redução da competição intraespecífica por recursos limitantes, principalmente água. Os achados corroboram com o trabalho conduzido por Horbe (2012), que obteve melhores desempenhos produtivos em zonas de baixo potencial com populações entre 46.000 e 64.000 plantas ha^{-1}.

Em contraste, as densidades elevadas (85.000 e 100.000 plantas ha^{-1}) intensificaram a competição intraespecífica sob condições de restrição hídrica – agravada pelas características edáficas limitantes dessas zonas (SANTI, 2007) –, resultando em senescência precoce das folhas basais. Este estresse fisiológico reflete a incapacidade do sistema radicular de suprir a demanda hídrica da cultura em populações adensadas sob condições de baixa disponibilidade no solo.

A senescência foliar é intensificada durante o enchimento de grãos, particularmente quando há um desequilíbrio entre a demanda metabólica dos grãos em formação e a área foliar remanescente (WRIGHT; SMITH; McWILLIAM, 1983 apud SANTOS e CARLESSO, 1998). Contudo, a perda de área foliar abaixo da espiga após o florescimento demonstrou não comprometer significativamente o rendimento final de grãos, uma vez que a capacidade fotossintética principal está concentrada nas folhas superiores, posicionadas acima do ponto de inserção da espiga. Estas folhas exibem maior eficiência na interceptação luminosa e são metabolicamente mais ativas durante a fase crítica de enchimento dos grãos (ALVIM et al., 2011). Este fenômeno explica a resiliência produtiva do milho mesmo sob condições de senescência parcial do dossel inferior.

Em todas as zonas de manejo, a população de 100.000 plantas ha^{-1} resultou em decréscimo significativo do rendimento de grãos, em função da intensificação da competição intraespecífica por recursos limitantes, notadamente água (SANGOI; SILVA; ARGENTA, 2010). Este efeito foi exacerbado pela coincidência de um déficit hídrico com o período crítico da cultura (Tabela 1), compreendido entre o florescimento e o enchimento de grãos, fase na qual a demanda hídrica atinge seu máximo. A restrição hídrica durante este estádio fenológico limitou a capacidade das plantas em suprir simultaneamente a demanda transpirativa e alocar fotoassimilados para os grãos em formação, resultando em redução do número de grãos por espiga e do peso de grãos.

Tabela 1 – Dados de precipitação pluviométrica (mm) durante a execução do experimento

MÊS	FASE DO CICLO	PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (mm)
SETEMBRO	V*	181
OUTUBRO	V	283
NOVEMBRO	V/R	92
DEZEMBRO	R	19
JANEIRO	R	123
FEVEREIRO	R	34

*Legenda: V – Vegetativa; R – Reprodutiva.
Fonte: Autores (2025).

Os estádios fenológicos críticos para a definição do rendimento de grãos do milho – compreendendo a iniciação floral, fertilização e enchimento de grãos – são altamente sensíveis ao déficit hídrico (MAGALHÃES e DURÃES, 2006). Durante este período, a demanda hídrica da cultura situa-se entre 7 e 8 mm diários (BERGONC et al., 2001; CIAMPITTI; ELMORE; LAUER, 2011). Entretanto, a disponibilidade hídrica foi severamente limitada, com precipitação acumulada de apenas 19 mm no mês de dezembro, o que representou uma insuficiência crítica para atender à demanda evapotranspirativa da cultura. Esta deficiência hídrica durante a fase reprodutiva comprometeu diretamente processos fisiológicos essenciais, como a polinização, a fixação de grãos e o acúmulo de assimilados nos grãos, resultando em restrições significativas ao potencial produtivo.

A sensibilidade do rendimento do milho à disponibilidade hídrica durante o período crítico foi claramente demonstrada por Bergamaschi et al. (2004). Em estudo comparativo entre safras, observou-se que na safra 1998/1999 um acumulado de 47 mm de precipitação durante esta fase resultou em uma produtividade de aproximadamente 8.000 kg ha^{-1}. Em nítido contraste, na safra 2002/2003, a ocorrência de estiagem durante o mesmo período crítico reduziu drasticamente a produtividade para menos de 2.000 kg ha^{-1}. Esta expressiva diferença foi atribuída aos severos impactos nos componentes morfofisiológicos do rendimento, particularmente na redução do número de espigas por planta e na diminuição do número de grãos por espiga.

Estes resultados evidenciam que a disponibilidade hídrica durante o período reprodutivo é fator determinante para a expressão do potencial produtivo da cultura, sendo decisiva para a definição dos componentes que compõem o rendimento final. A forte correlação entre estresse hídrico no período crítico e perdas produtivas reforça a necessidade de implementação de estratégias de manejo adaptativas, como o ajuste fino da densidade populacional e a seleção de genótipos com maior tolerância ao déficit hídrico, visando mitigar os efeitos de veranicos durante esta fase fenológica crucial para a definição da produtividade.

ISBN 978-65-990392-6-3

Conforme demonstrado por Leuthold et al. (2022), fatores como a elevação topográfica, as características físicas e químicas do solo e a dinâmica da água no perfil edáfico exercem influência determinante sobre o rendimento de grãos do milho. A interação entre esses fatores condiciona a capacidade produtiva de cada ambiente, uma vez que a elevação afeta diretamente a drenagem e a exposição a ventos, as propriedades físicas do solo regulam a infiltração e a retenção hídrica, e as características químicas determinam a disponibilidade de nutrientes. A água armazenada no solo, por sua vez, atua como elemento integrador desses fatores, sendo o principal mediador da produtividade, especialmente em condições de sequeiro. Esta relação explica a base técnica para a divisão do talhão em zonas de manejo com distintos potenciais produtivos, permitindo o planejamento de estratégias de manejo diferenciadas que considerem a variabilidade intrínseca da área agrícola.

Os parâmetros físicos do solo, como taxa de infiltração, tamanho de agregados e densidade, influenciam diretamente o armazenamento de água no perfil do solo. A taxa de infiltração destaca-se como o indicador de maior impacto no desempenho produtivo das culturas (SANTI, 2007), uma vez que determina a eficiência de aproveitamento da água pluvial. Adicionalmente, essas propriedades físicas regulam a capacidade de retenção hídrica do solo (AMADO et al., 2009), sendo cruciais para a disponibilidade de água durante os períodos críticos do desenvolvimento da cultura do milho. A manutenção de condições físicas adequadas do solo é, portanto, essencial para maximizar a eficiência do uso da água e otimizar o potencial produtivo agrícola.

Em contraponto aos achados convencionais, Ortiz (2019) demonstrou que em áreas sob sistema de agricultura regenerativa há mais de 10 anos e plantio direto há 37 anos no município de Faxinal dos Guedes-SC, as propriedades físicas do solo – incluindo densidade, resistência à penetração e porosidade total – não apresentaram variação significativa entre zonas de alto, médio e baixo potencial produtivo. Este resultado sugere que práticas de manejo conservacionistas de longa duração podem homogeneizar as condições físicas do solo, atenuando as diferenças originais entre zonas de manejo. Os dados corroboram Santi (2007), que observou que o uso consorciado de plantas de cobertura (aveia, ervilhaca e nabo forrageiro) promoveu melhoria nas propriedades físicas de zonas de baixo potencial, enquanto manteve as características já favoráveis das zonas de médio e alto potencial. Estes estudos indicam que a adoção continuada de sistemas integrados de manejo do solo pode reduzir a variabilidade espacial de propriedades edáficas, criando condições mais uniformes para o desenvolvimento das culturas entre diferentes zonas de produtividade.

Além de melhorar as propriedades físicas do solo, as plantas de cobertura exercem função crucial na conservação hídrica através da palhada residual. A cobertura vegetal proveniente dessas plantas permite maior armazenamento de água no solo comparado a solos descobertos, devido a múltiplos mecanismos: a palha reduz a temperatura do solo, diminui a evaporação direta e protege contra as perdas por erosão hídrica e eólica (MORAES et al., 2016). Esses benefícios são ampliados quando associados ao sistema plantio direto, que conjuntamente com a cobertura vegetal promove maior infiltração e retenção de água no perfil do solo (KLEIN e KLEIN, 2014). Esta sinergia entre plantas de cobertura e plantio direto cria condições microclimáticas favoráveis que atenuam flutuações térmicas e mantêm a umidade do solo, fatores particularmente benéficos para culturas sensíveis ao déficit hídrico como o milho durante seu período crítico de desenvolvimento.

ISBN 978-65-990392-6-3

A disponibilidade e armazenamento de água no solo são fortemente influenciados pelas características do relevo (IBRAHIM e HUGGINS, 2011; MARTINEZ-FARIA e BASSO, 2020). Segundo os autores, zonas de alta produtividade (ZA) geralmente ocorrem em áreas de menor elevação e relevo mais plano, condições que favorecem maior infiltração e armazenamento de água no perfil do solo. Em contraste, zonas de baixa produtividade (ZB) estão predominantemente associadas a áreas mais elevadas, onde a combinação de características edáficas e declive acentuado resulta em maior escoamento superficial e reduzida retenção hídrica. Zonas de média produtividade (ZM) ocupam posições intermediárias no relevo, sendo influenciadas por declividades moderadas que permitem algum escoamento superficial, porém em menor intensidade comparadas a zonas de baixa (SANTI, 2007). Esta relação entre topografia e dinâmica hídrica explica em parte a variabilidade espacial da produtividade observada em lavouras sob regime de sequeiro, particularmente em regiões com ocorrência de veranicos durante o ciclo das culturas.

Oliveira (2014), ao investigar arranjos populacionais em zonas de manejo com diferentes características topográficas para o híbrido de milho P1630, constatou que áreas com relevo plano apresentaram produtividade de grãos significativamente superior comparado a áreas declivosas. Este resultado evidencia o papel determinante da topografia na eficiência do uso de recursos hídricos pela cultura. Complementarmente, a profundidade efetiva do perfil do solo mostrou-se crucial para a disponibilidade hídrica e o desenvolvimento do milho. Bergamaschi e Matzenauer (2014) alertam que impedimentos físicos no perfil do solo restringem o crescimento radicular, resultando em sistemas radiculares mais superficiais. Magalhães (2017) demonstrou que plantas com sistema radicular mais profundo exibem maior resiliência sob condições de déficit hídrico, enquanto sistemas radiculares rasos exacerbam os efeitos do estresse hídrico, culminando em expressivas quedas de produtividade. Esta relação entre profundidade do solo, desenvolvimento radicular e tolerância à seca destaca a importância do manejo adequado do perfil do solo para a sustentabilidade produtiva em regiões com ocorrência de veranicos.

Conforme demonstrado por Passinato (2022), a disponibilidade hídrica do solo é um fator determinante na composição da microbiota edáfica das diferentes zonas de manejo. Em seu estudo, o autor evidencia que, em zonas de alta produtividade (ZA), a maior capacidade de retenção de água estabelece condições microbianas mais favoráveis, especificamente para o desenvolvimento de microrganismos promotores de crescimento vegetal, tais como *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis* e *Bacillus megaterium*, quando inoculados via sulco de plantio**.**

Estudos de Silva e Reis (2021) e Guimarães et al. (2021) demonstram que a coinoculação dessas bactérias potencializa a absorção de nutrientes mesmo em doses abaixo das recomendações técnicas, promovendo incrementos significativos na produtividade do milho. Em contraste, nas zonas de baixa produtividade (ZB), as condições de restrição hídrica favorecem a predominância de microrganismos fitopatogênicos como *Fusarium* sp.e *Macrophomina* sp. (Passinato, 2022), cuja infecção nas plantas representa um fator adicional de redução produtiva. Esta divergência na composição microbiana entre zonas destaca a importância do manejo diferenciado para potencializar benefícios microbiológicos em ZA e mitigar patógenos em ZB.

A fertilidade do solo, especialmente o equilíbrio entre cálcio, magnésio e potássio, é um fator crucial para a produtividade do milho (Santi et al., 2012). Entretanto, neste estudo, o desbalanço de bases foi descartado como variável limitante devido à correção prévia do solo com aplicação de calcário calcítico, calcário dolomítico e cloreto de potássio na área experimental. Esta calibração garantiu que as diferenças de produtividade observadas entre zonas de manejo refletissem principalmente outros fatores, como a disponibilidade hídrica e o manejo populacional, em vez de limitações nutricionais.

O uso de plantas de cobertura, particularmente espécies com alta produção de massa seca, melhora a fertilidade do solo ao elevar os teores de carbono orgânico (GONÇALVES e CERETTA, 1999; LOCATELLI, 2018). Leguminosas como a ervilhaca (*Vicia* spp.), quando utilizadas em consórcio antecedendo o milho, incrementam significativamente a adição de carbono e nitrogênio ao solo (Lovato et al., 2004), contribuindo para o aumento da produtividade da cultura subsequente. Esta prática representa uma estratégia eficaz para a melhoria contínua da fertilidade edáfica e para a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

A absorção de nitrogênio pelo milho varia significativamente entre zonas de manejo, com maiores taxas observadas em zonas de alta produtividade comparado a zonas de média e baixa produtividade (HORBE, 2012). Esta variação está intrinsecamente ligada à disponibilidade hídrica, que influencia tanto a mineralização do nitrogênio orgânico quanto a eficiência de absorção radicular. Durante os estádios críticos de pré-florescimento até o início reprodutivo, a cultura demanda elevadas quantidades de nitrogênio, fósforo e potássio (CIAMPITTI; ELMORE; LAUER, 2011). Sob condições de déficit hídrico, a absorção desses nutrientes é severamente comprometida: o nitrogênio, dependente do fluxo de massa para sua disponibilização, e o fósforo e potássio, que se movem principalmente por difusão, têm sua dinâmica radicular drasticamente reduzida em solos com baixo teor de umidade (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; HAVLIN et al., 2005). Este mecanismo explica em parte os menores valores de absorção nitrogenada observados em zonas de baixa produtividade, onde a restrição hídrica limita simultaneamente a disponibilidade e a captação de nutrientes.

As características intrínsecas de cada zona de manejo demonstram que técnicas como plantio direto, rotação de culturas com plantas de cobertura e inoculação com microrganismos benéficos podem melhorar seu potencial produtivo. No entanto, fatores invariáveis como declividade e elevação topográfica exercem influência determinante na disponibilidade hídrica, que se mostrou o principal fator condicionante do rendimento de grãos. O ajuste da população de plantas de acordo com o potencial de cada zona configura-se como estratégia eficaz para otimizar o uso de recursos limitantes (nutrientes, radiação solar e água), particularmente em anos com ocorrência de estiagem, onde a restrição hídrica durante o período crítico torna-se o elemento decisivo para a produtividade. Esta abordagem permite compensar limitações impostas pelas condições edafoclimáticas não modificáveis, direcionando recursos para onde possam ser mais eficientemente convertidos em produção.

ISBN 978-65-990392-6-3

4 CONCLUSÃO

A população de plantas e as zonas de manejo influenciaram significativamente os componentes de rendimento e a produtividade final. A competição intraespecífica por recursos, agravada pelo déficit hídrico no período crítico, reduziu o desempenho nas populações mais altas, especialmente nas zonas de média e baixa produtividade. Conclui-se que a semeadura em taxa variável, aplicando populações menores (55.000 plantas ha^{-1}) nas zonas menos férteis e maiores (85.000 plantas ha^{-1}) apenas na zona de alta produtividade, é uma estratégia eficaz.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fazenda Banhado Verde pela valiosa colaboração no desenvolvimento deste trabalho, por meio do fornecimento de dados, equipamentos e de toda a infraestrutura logística indispensável para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALVIM, K. R. T. et al. Redução da área foliar em plantas de milho na fase reprodutiva. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 58, n. 4, p. 413–418, 2011.

AMADO, T. J. C. et al. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1101–1110, ago. 2007.

AMADO, T. J. C. et al. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 831–843, 2009.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F. da; SANGOI, L. Arranjo de plantas em milho: análise do estado-da-arte. **Ciência Rural**, v. 31, p. 1075–1084, 2001.

BERGAMASCHI, H. et al. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 831–839, 2004.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS Ascar, v. 84, p. 85, 2014.

BERGONCI, J. I. et al. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 7, p. 949–956, jul. 2001.

CIAMPITTI, I. A.; ELMORE, R. W.; LAUER, J. Corn growth and development. **Dent**, v. 5, n. 75, 2011.

CRUZ, R. S.; SOUZA, A. L.; PEREIRA, L. M. Utilização do milho na alimentação animal: composição e importância nutricional. **Revista de Zootecnia**, v. 47, n. 3, p. 1–10, 2020.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Maize in human nutrition and industry**. Rome: FAO, 2021.

GONÇALVES, C. N.; CERETTA, C. A. Plantas de cobertura de solo antecedendo o milho e seu efeito sobre o carbono orgânico do solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 307–313, 1999.

GUIMARÃES, V. F. et al. Eficiência de inoculante contendo Bacillus megaterium (B119) e Bacillus subtilis (B2084) para a cultura do milho, associado à fertilização fosfatada. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e431101220920, 2021. Disponível em: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/20920. Acesso em: 21 jul. 2025.

HAVLIN, J. L.; BEATON, J. D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. B. **Soil fertility and fertilizers**: an introduction to nutrient management. 7. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005. 515 p.

HORBE, Tiago de Andrade Neves. **Agricultura por ambiente: manejo sítio específico da população de milho**. 2012. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

IBRAHIM, H. M.; HUGGINS, D. R. Spatio-temporal patterns of soil water storage under dryland agriculture at the watershed scale. **Journal of Hydrology**, n. 404, p. 186–197, 2011.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Influência do manejo do solo na infiltração de água. **Revista Monografias Ambientais**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 3915–3925, 2014. DOI: 10.5902/2236130814989. Disponível em: https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/1498 . Acesso em: 8 set. 2025.

LEUTHOLD, S. J. et al. Weather-dependent relationships between topographic attributes and maize and soybean yield. **Field Crops Research**, 281:108519, 2022.

LOVATO, Thomé et al. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 175–187, 2004.

MADDONI, G. A.; OTEGUI, M. E.; CIRILO, A. G. Plant population Amsterdan density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 71, p. 183–193, 2001.

MAGALHÃES, Bruna Gomes. **Simulação de estratégias de manejo da cultura do milho para mitigar efeitos de mudanças climáticas**. 2017. Trabalho de Conclusão

de Curso (Engenharia Agronômica) – Universidade Federal de São João del Rei, Sete Lagoas, 2017.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. Fisiologia da produção de milho. **Embrapa Milho e Sorgo-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, Sete Lagoas, dez. 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1997.

MARTINEZ-FERIA, R. A.; BASSO, B. Unstable crop yields reveal opportunities for site specific adaptations to climate variability. **Scientific Reports**, 10, 2885, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41598-020-59494-2.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, v. 22, n. 1, p. 83–92, 2002.

MORAES, M. T. de et al. Benefícios das plantas de cobertura sobre as propriedades físicas do solo. In: TIECHER, T. (Org.). **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2016. p. 34–48.

OLIVEIRA, Juan Paulo Padilha de. **Influência da densidade populacional na fenologia e na produtividade da cultura do milho**. 2014. Dissertação (Mestrado em Agricultura de Precisão) – Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

ORTIZ, Juan Alberto Martinez. **Propriedades físicas do solo em sistema plantio direto: associação com a produtividade da soja e variações em relação à mata nativa**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2019.

PASSINATO, Jardel Henrique. **Avaliação da saúde do solo em sistemas agrícolas sob agricultura conservacionista no Brasil**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.

PASSOS, F. D. A. et al. Produtividade do milho em diferentes populações de plantio. **Revista Cultivando o Saber**, p. 1–11, 2019.

SANGOI, L.; SILVA, P. R. F.; ARGENTA, G. **Estratégias de manejo do arranjo de plantas para aumentar o rendimento de grãos de milho**. Lages: Graphel, 64 p., 2010.

SANTI, A. L. et al. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 1346–1357, 2012.

SANTI, Antônio Luis. **Relações entre Indicadores de Qualidade do Solo e a Produtividade das Culturas em Áreas com Agricultura de Precisão**. 2007. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

SILVA, G. H. da; REIS, H. A. dos. **Desempenho agronômico de plantas de milho inoculadas com Azospirillum brasilense e Bacillus subtilis**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – UNICESUMAR, Maringá, 2021.

SILVA, J. P.; OLIVEIRA, M. A.; FERNANDES, R. T. Importância do milho na alimentação humana e perspectivas de aproveitamento. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 24, n. 2, p. 45–56, 2018.

WRIGHT, G. C.; SMITH, R. G.; McWILLIAM, J. R. Differences between two grain sorghum genotypes in adaptation to drought stress. I. Crop growth rate and yield response. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 34, p. 615–626, 1983.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 29

IMPACTO NA ESCOLHA DE DIFERENTES MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DOS MAPAS DE PRESCRIÇÃO DE CALAGEM

Impact on the choice of different methods of interpolation of liming prescription maps

André Müllich[1]; Ingrid Lima[1]; José Bredow[1]; Régis Ruoso[1]; Lúcio de Paula Amaral[1]

[1] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Av. Roraima 1000 – Camobi, 97105-000, Santa Maria – Rio Grande do Sul, Brasil, andre.mullich@hotmail.com, ingrid.limaoc@gmail.com, josebredow@hotmail.com, regisruoso@hotmail.com, lucio.amaral@ufsm.br

RESUMO

A interpolação espacial de atributos do solo é essencial para a recomendação localizada de corretivos, como o calcário, dentro do contexto da Agricultura de Precisão. Este trabalho teve como objetivo comparar os métodos de Krigagem, IDW (*Inverse Distance Weighting*) e Spline na interpolação da dose de calcário, avaliando suas implicações práticas na recomendação agronômica. Em um talhão de aproximadamente 87 ha, foram amostrados 49 pontos em grade regular de 120 metros, com coleta de cinco subamostras por ponto. Os dados foram processados no software QGIS, e a Krigagem foi ajustada com base no modelo esférico do semivariograma. As análises revelaram que o IDW apresentou menor erro médio absoluto (MAE = 367 kg ha^{-1}) e maior aderência às classes reais de dose, enquanto a Krigagem suavizou os valores extremos, resultando em subestimações em áreas críticas. Apesar da proximidade nos volumes totais de calcário recomendados pelos três métodos, observou-se uma diferença significativa na distribuição espacial das doses. Os resultados obtidos levantam importantes reflexões sobre a escolha do interpolador mais adequado em cenários com amostragens densas e de alta qualidade.

Palavras-chave: Interpolação espacial. Taxa variada de calagem. Precisão agronômica.

ABSTRACT

Spatial interpolation of soil attributes is essential for site-specific liming recommendations within the framework of Precision Agriculture. This study aimed to compare Kriging, IDW (*Inverse Distance Weighting*), and Spline interpolation methods for estimating lime application rates and to evaluate their practical implications for agronomic recommendations. In a field of approximately 80 ha, 49 georeferenced sampling points were collected on a regular 120-meter grid, with five subsamples per point. Data were processed using the QGIS software, and the Kriging model was calibrated using a spherical semivariogram. Analyses showed that IDW presented the lowest mean absolute error (MAE = 367 kg ha^{-1}) and better adherence to sampled dose classes, while Kriging smoothed extreme values, potentially underestimating lime needs in critical areas. Although total recommended lime volumes across the three methods were similar, significant differences were observed in spatial distribution. The findings raise important considerations about the most suitable interpolation approach when working with dense and high-quality sampling data.

Keywords: Spatial interpolation. Variable rate liming. Agronomic accuracy.

1 INTRODUÇÃO

A acidez do solo é um dos principais desafios enfrentados na agricultura brasileira, especialmente em regiões tropicais, onde predominam solos intensamente intemperizados. Fatores como a lixiviação de cátions básicos (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}) do perfil do solo, o uso contínuo de fertilizantes amoniacais e a remoção de cátions pelas culturas sem reposição adequada contribuem substancialmente para a acidificação do solo (EMBRAPA).

Para lidar com esse problema de forma eficiente e econômica, a agricultura de precisão (AP**)** tem se consolidado como uma estratégia promissora. Por meio do uso de geotecnologias, sensores e análise espacial, a AP permite mapear e manejar a variabilidade dos atributos do solo, possibilitando a aplicação localizada de corretivos, fertilizantes e outros insumos (BASSO et al. 2019).

Entre as ferramentas analíticas utilizadas nesse contexto, a interpolação espacial desempenha papel fundamental ao permitir a estimativa de valores em locais não amostrados a partir de dados georreferenciados. A geoestatística, por sua vez, oferece métodos como a krigagem e a co-krigagem, capazes de incorporar a dependência espacial dos dados por meio do modelo variográfico, proporcionando estimativas mais precisas e estatisticamente robustas (VIEIRA et al. 2002; YAMAMOTO e LANDIM, 2013).

Além dos métodos geoestatísticos, interpoladores determinísticos como o IDW (*Inverse Distance Weighting*) e o Spline também são amplamente utilizados. O IDW calcula estimativas com base na distância euclidiana entre os pontos, enquanto o Spline utiliza funções baseadas em superfícies suaves, permitindo maior flexibilidade na modelagem dos dados (ESRI, 2012). Apesar de menos sofisticados do ponto de vista estatístico, esses métodos podem apresentar melhor aderência aos valores observados em certas condições de campo.

Diante disso, o objetivo do trabalho é compreender as implicações práticas da escolha do método de interpolação, sobretudo em contextos como a recomendação de doses de calcário, em que pequenas variações na estimativa podem gerar subdosagens ou superdosagens com impacto direto na correção da acidez do solo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Descrição da área

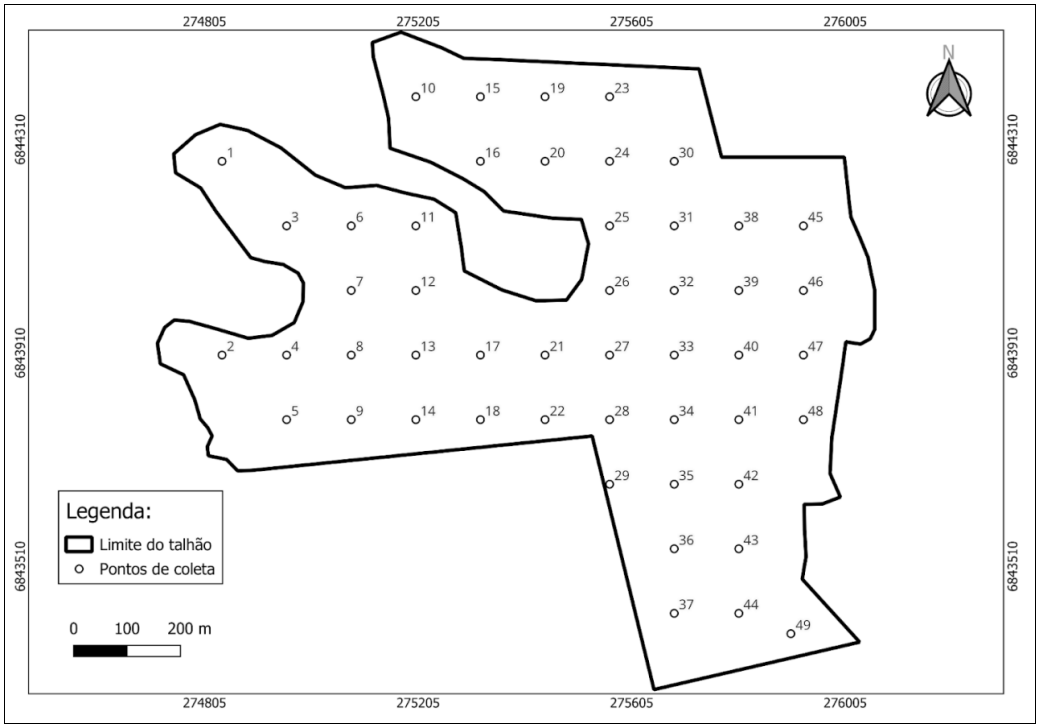
O presente estudo foi realizado no município de Santa Bárbara do Sul, localizado no estado do Rio Grande do Sul. As coletas de solo foram realizadas em um talhão agrícola de 87,80 hectares, totalizando 49 pontos amostrais georreferenciados, com amostragens realizadas na profundidade de 0 a 20 cm.

Cada ponto amostral foi composto por cinco subamostras, sendo uma amostra central, que definiu as coordenadas geográficas de referência, e quatro subamostras dispostas ao redor desta, formando um desenho em cruz, com distância de 10 metros em relação ao ponto central. Essa estratégia foi adotada com o intuito de aumentar a representatividade local da amostragem e reduzir o efeito de variabilidade pontual.

O espaçamento entre os pontos seguiu um grid regular intermediário entre os modelos convencionais de 100 m (*grid* 1) e 141 m (*grid* 2), resultando em uma

distância média de aproximadamente 120 metros entre os pontos (Figura 1), o que proporciona densidade amostral adequada para estudos de interpolação em escala de talhão.

Figura 1 - Polígono com o limite do talhão analisado e os pontos de coleta.



Fonte: Autores (2025)

2.2 Interpolação espacial dos dados

A interpolação espacial dos dados foi realizada utilizando três métodos: *IDW* (*Inverse Distance Weighting*), Spline e Krigagem Ordinária. Para assegurar uniformidade na resolução espacial, todas as interpolações foram padronizadas com tamanho de pixel de 20 metros, cobrindo a mesma extensão geográfica.

Para o método *IDW* (Equação 1), foi adotado o valor de 4,0 para o coeficiente de ponderação (distância para coeficiente P), conforme sugerido na literatura para áreas com variação moderada dos atributos do solo (VIEIRA et al., 2002). A extensão de saída foi definida manualmente a partir da área amostral, e o raster final gerado teve 63 linhas por 68 colunas.

IDW (Inverse Distance Weighting), conforme Shepard (1968):

$$Z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{Z(x_i)}{d(x_0,x_i)^P}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d(x_0,x_i)^P}} \quad (1)$$

$Z(x_0)$: Valor interpolado no ponto x_0.

$Z(x_i)$: Valor observado no ponto x_i (com i =1, 2, ..., n).

$d(x_0,x_i)$: Distância entre o ponto de interpolação x_0 e o ponto conhecido x_i.

ISBN 978-65-990392-6-3

P: Expoente de ponderação (geralmente 2, mas ajustável), que define a taxa de decaimento da influência com a distância.

n: Número total de pontos conhecidos usados na interpolação.

Na interpolação pelo método Spline (Equação 2), utilizou-se a técnica de base fina (*Thin Plate Spline*), conforme Duchon (1977), com distância máxima de busca de 120 metros e considerando todos os pontos dentro do raio de busca. Foram utilizados entre 16 e 20 pontos vizinhos para cada estimativa de célula, com regularização definida em 0,0001 para suavização do modelo. O parâmetro fit foi mantido em zero, conforme o padrão do algoritmo.

$$Z(x, y) = T(x, y) + \sum_{j=1}^{n} \lambda_j R(r_j) \quad (2)$$

$Z(x, y)$: Valor interpolado (ou suavizado) na coordenada (x, y).

$T(x, y)$: Termo polinomial (geralmente linear ou constante) que garante que o sistema seja bem comportado.

$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j R(r_j)$: Combinação linear de funções de base radial.

λ_j: Pesos ou coeficientes a serem determinados.

$R(r_j)$: Função de base radial aplicada à distância r_j.

r_j: Distância entre o ponto (x, y) e o ponto de controle j.

No caso da Krigagem Ordinária (Equação 3), o modelo variográfico foi ajustado com base na análise exploratória dos dados empíricos, sendo testadas diferentes funções de ajuste (esférico, exponencial, gaussiano e linear), conforme Equação 4. A seleção do modelo final foi feita com base na minimização dos erros de predição (RMSE, MAE e Bias), conforme os valores obtidos por validação cruzada. Embora testes iniciais tenham sido conduzidos no RStudio para avaliação comparativa dos modelos de interpolação, o mapa final de variabilidade espacial foi gerado por meio do *plugin SmartMap* (PEREIRA et al., 2022) no software *QGIS* (versão 3.36.3-Maidenhead), por apresentar melhor integração visual e controle de parâmetros variográficos no ambiente geoespacial.

$$Z^*(x_o) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(x_i) \quad (3)$$

$Z^*(x_o)$: Estimativa do valor da variável regionalizada no ponto x_o (ponto de interesse).

$Z(x_i)$: Valor observado da variável no ponto x_i.

λ_i: Peso atribuído ao valor observado no ponto x_i.

ISBN 978-65-990392-6-3

n: Número de pontos amostrais considerados na vizinhança de x_o.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

$\gamma(h)$: Valor do semivariograma para a distância de separação h. Mede a variabilidade espacial da variável Z.

$Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$: Valores da variável regionalizada em dois pontos separados por uma distância h.

$N(h)$: Número de pares de pontos separados por h.

h: Distância (ou vetor de separação) entre os pontos considerados.

Todas as interpolações (*IDW, Spline e Krigagem*) foram realizadas no *QGIS*, software livre de código aberto, utilizando um tamanho de pixel padronizado de 20 metros, a fim de manter comparabilidade entre os métodos. A interpolação por krigagem considerou a estrutura de dependência espacial observada nos dados e foi aplicada após o ajuste do modelo variográfico no próprio *plugin SmartMap* (PEREIRA et al., 2022), garantindo compatibilidade com a área de estudo e maior fidelidade à superfície real observada em campo.

2.3 Avaliação da acurácia dos modelos

Para avaliar a acurácia dos modelos de interpolação, foram utilizadas métricas de erro preditivo que permitem quantificar a discrepância entre os valores estimados e os valores observados nas amostras. Essas métricas foram calculadas por meio da validação cruzada do tipo *Leave-One-Out Cross Validation* (LOOCV), em que cada ponto é removido sequencialmente do conjunto de dados, sendo o seu valor estimado a partir dos demais pontos. A comparação entre o valor estimado e o valor real fornece a base para o cálculo das medidas de erro apresentadas a seguir.

O Erro Médio Absoluto (MAE) (Equação 5) expressa a média das diferenças absolutas entre valores observados e preditos, refletindo a magnitude média do erro sem considerar sua direção (superestimação ou subestimação).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} |\hat{y}i - yi| \quad (5)$$

A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) (Equação 6) dá maior peso a erros elevados, uma vez que considera o quadrado das diferenças entre valores observados e estimados. Dessa forma, é uma métrica sensível a desvios extremos, indicando a precisão geral do modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} (\hat{y}i - yi)^2} \quad (6)$$

ISBN 978-65-990392-6-3

O Viés (Bias) (Equação 7) mede a tendência sistemática do interpolador em superestimar ou subestimar os valores. Valores positivos indicam superestimação, enquanto valores negativos revelam subestimação.

$$BIAS = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}i - yi) \quad (7)$$

Onde:

$\hat{y}i$ é o valor estimado.

yi é o valor observado.

n é o número total de amostras.

Por fim, a Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR) (Equação 8) representa o somatório das diferenças ao quadrado entre valores observados e preditos. Essa métrica, utilizada no ajuste do semivariograma, indica a qualidade do modelo variográfico: quanto menor o SQR, melhor o ajuste entre a função teórica e os pontos empíricos.

$$SQR = \sum_{i=1}^{n}(yi - \hat{y}i)^2 \quad (8)$$

Onde:

$\hat{y}i$ é o valor predito pelo modelo teórico no ponto.

yi *é o v*alor observado no ponto.

n é o número de pares de pontos no semivariograma.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para caracterizar a variabilidade dos dados brutos de recomendação de calcário, realizou-se uma análise estatística descritiva considerando as 49 amostras georreferenciadas coletadas no talhão experimental. Essa abordagem permitiu avaliar a distribuição e a tendência central dos dados, bem como a dispersão das doses recomendadas em kg ha-1. As estatísticas calculadas incluíram medidas de tendência central (média, mediana e moda), medidas de dispersão (desvio padrão e coeficiente de variação), e medidas de forma (assimetria e curtose). A Tabela 1 apresenta o resumo das estatísticas descritivas utilizadas neste estudo, fornecendo uma visão geral da estrutura dos dados antes da aplicação dos métodos de interpolação espacial.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 1 – Estatísticas descritivas das doses de calcário (kg ha^{-1}) recomendadas com base nas 49 amostras georreferenciadas.

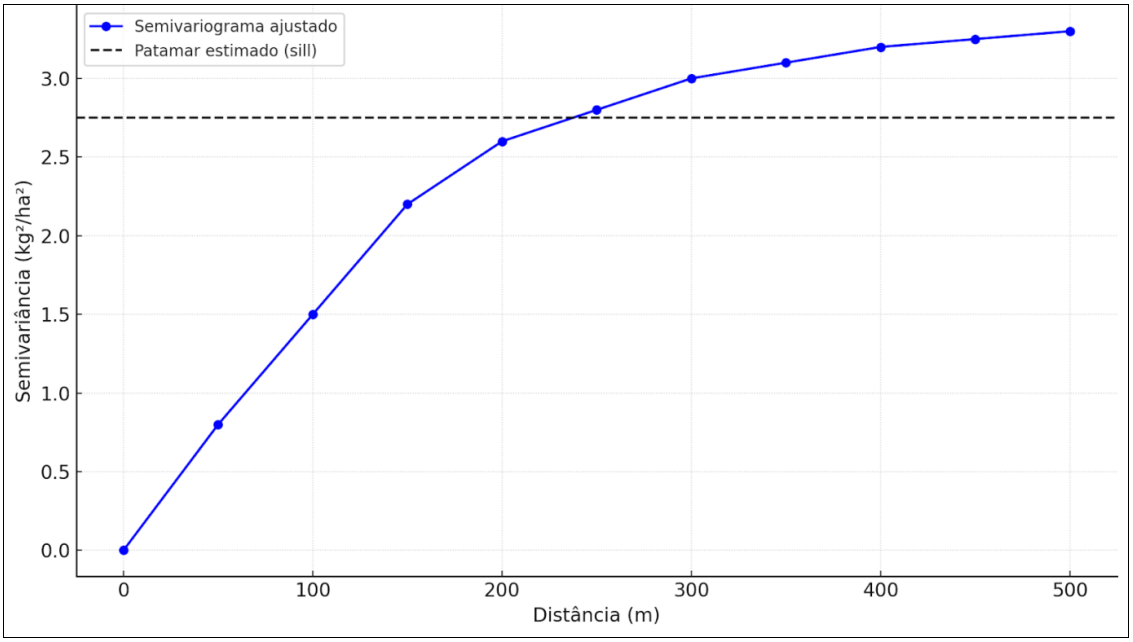
N	Média	Mediana	Moda	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV (%)	Assimetria	Curtose
49	3589,8	3200	3800	1663,11	0	5000	46,33	-1,28	0,44

Legenda: Coeficiente de variação (cv).
Fonte: Autores (2025)

Os dados de recomendação de calagem apresentaram alta variabilidade espacial (CV = 46,33%), refletindo a heterogeneidade química do solo na área estudada. A assimetria negativa (*Skewness* = -1,28) e a curtose platicúrtica (*Kurtosis* = 0,44) sugerem uma distribuição levemente inclinada para valores mais baixos, com menor concentração de dados em média e caudas menos pronunciadas características que devem ser consideradas na escolha do método de interpolação e na interpretação agronômica dos mapas gerados.

A Figura 2 apresenta o semivariograma ajustado com o modelo esférico, que se mostrou o mais adequado ao comportamento espacial dos dados, com base na forma da curva e na coerência agronômica do alcance obtido. Os parâmetros estimados foram: efeito pepita (*nugget*) igual a 0, patamar (*sill*) de aproximadamente 2.914.206 kg²/ha², soma dos quadrados dos resíduos 18157585 e alcance (*range*) de 200 metros. Esse alcance indica que existe correlação espacial significativa entre os pontos amostrais em distâncias de até 200 metros. A partir dessa distância, os valores da variável deixam de estar espacialmente correlacionados, passando a apresentar comportamento aleatório.

Figura 2 - Modelo esférico ajustado ao semivariograma experimental da recomendação de calcário, utilizado na interpolação por krigagem ordinária.



Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

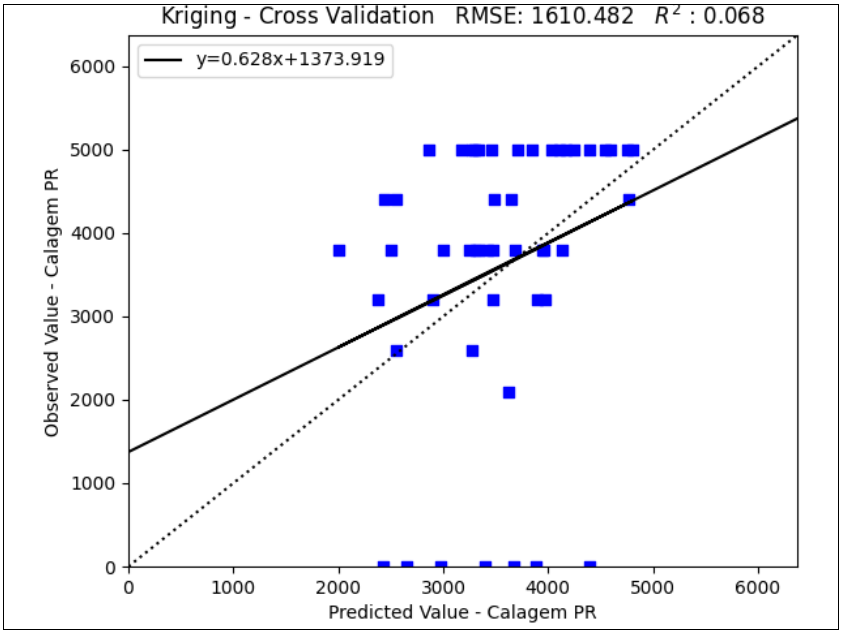
A ausência de efeito pepita sugere que não há variabilidade não explicada a curtas distâncias, o que pode ser atribuído à boa qualidade das amostragens e à homogeneidade da coleta no campo. Além disso, o patamar identificado representa a variância total dos dados e indica o limite em que a semivariância se estabiliza. A curva ajustada apresenta uma boa aderência aos pontos empíricos do semivariograma, com aumento progressivo da semivariância até o patamar, refletindo uma distribuição espacial coerente para a aplicação do método geoestatístico.

Após a validação cruzada é observado na Figura 3 o R^2 muito baixo (0,068) indicando que os valores preditos explicam pouquíssima variação dos valores observados. Como o coeficiente angular (0,628) é menor que 1, o modelo tende a prever valores mais próximos da média, “achatando” os extremos e, portanto, subestimando doses mais altas e superestimando doses mais baixas. O RMSE de aproximadamente 1610 kg ha^{-1} é alto considerando que sua média de doses brutas está em torno de 3183 kg ha^{-1} (baseado na estatística descritiva anterior), o que representa mais de 50% da média.

Embora o modelo esférico do semivariograma tenha apresentado aderência visual aos dados empíricos (Figura 2), a alta soma dos quadrados dos resíduos (SQR = 18157585) indica dificuldades no ajuste, comprometendo a confiabilidade da krigagem. Essa limitação, associada à suavização inerente ao método, resultou em subestimativas de doses em áreas críticas (Figura 3c), o que pode impactar negativamente a correção da acidez do solo.

A Figura 4 apresenta os mapas de variabilidade espacial da dose de calcário recomendada, gerados por meio dos métodos de interpolação *IDW, Spline e Krigagem Ordinária*. É possível observar diferenças relevantes entre os interpoladores tanto na representação espacial das zonas quanto na quantidade total de corretivo estimada para o talhão.

Figura 3 – Relação entre valores observados e preditos na validação cruzada da krigagem.



Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

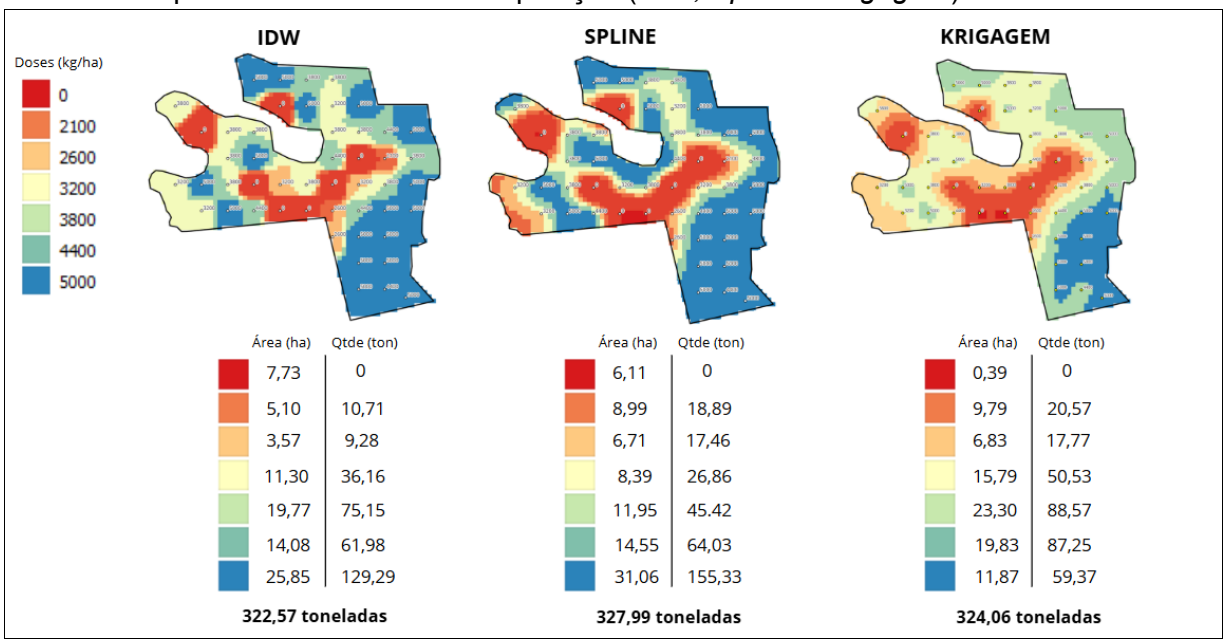
O método *IDW* (Figura 4a) mostrou-se mais fiel aos valores amostrados, preservando com maior precisão as classes de doses observadas nos pontos de coleta. Isso é evidenciado pela manutenção de áreas extensas nas classes mais elevadas, como 4400 e 5000 kg ha^{-1}, especialmente na porção sul e sudoeste do talhão. A quantidade total estimada com este método foi de 322,57 toneladas, valor intermediário entre os três interpoladores.

O método *Spline* (Figura 4b), por sua vez, apresentou uma suavização moderada das transições entre classes, mantendo ainda certa fidelidade aos extremos. Essa característica se reflete na maior quantidade total estimada de corretivo (327,99 toneladas), o que pode indicar uma leve superestimação em áreas de transição entre classes. Apesar disso, o Spline se destaca por gerar uma superfície visualmente contínua, com boa capacidade de representar padrões ondulatórios da variabilidade espacial.

Já a Krigagem Ordinária (Figura 4c) apresentou uma quantidade total de corretivo estimada em 324,06 toneladas, próximo à média, mas com uma redistribuição que pode comprometer a acurácia em zonas críticas do solo. Esse comportamento é típico da Krigagem quando a variância espacial é suavizada por modelos ajustados do semivariograma, como discutido anteriormente.

Além da variação visual e quantitativa, destaca-se que todos os interpoladores mantiveram a coerência espacial das classes, respeitando a estrutura de blocos definida pela amostragem regular em grid. No entanto, do ponto de vista agronômico, o *IDW* ofereceu a melhor representação das doses reais, o que reforça sua adequação em contextos onde os pontos amostrais são confiáveis e a aplicação localizada requer precisão elevada.

Figura 4 – Distribuição espacial das doses de calcário e quantificação total estimada para cada método de interpolação (*IDW, Spline e Krigagem*).

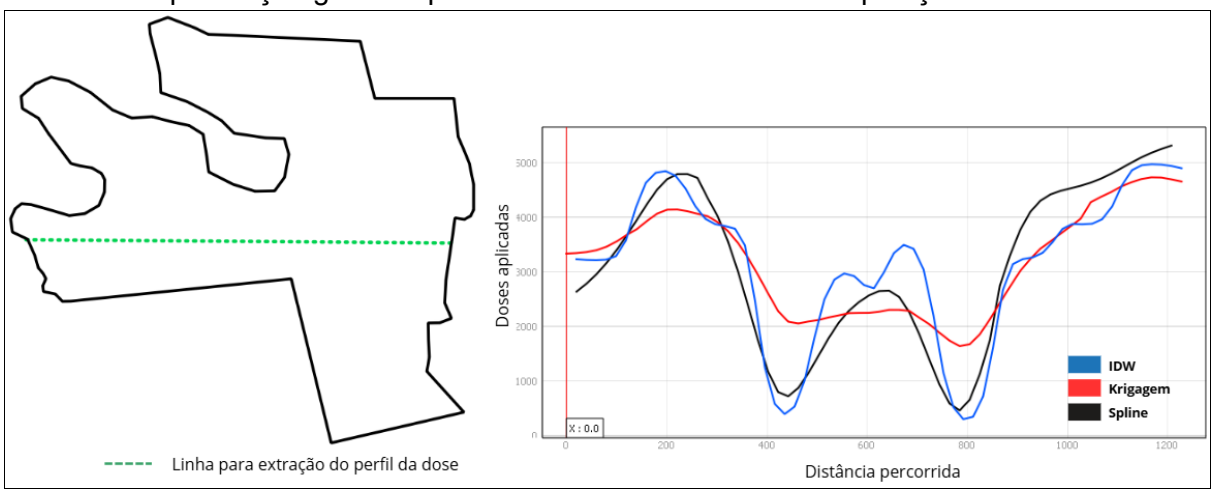


Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

A Figura 5 apresenta o perfil longitudinal das doses de calcário ao longo de um transecto estabelecido sobre os mapas de prescrição gerados pelos métodos de interpolação *IDW, Spline e Krigagem*. O gráfico à direita ilustra a variação das doses aplicadas em função da distância percorrida ao longo da linha de extração (em verde) representada no mapa à esquerda. Cada curva representa a resposta espacial de um interpolador, evidenciando as diferenças na distribuição das doses em um mesmo trajeto de amostragem.

Figura 5 - Dose de calcário ao longo de um transecto estabelecido no mapa de prescrição gerados pelos diferentes métodos de interpolação.



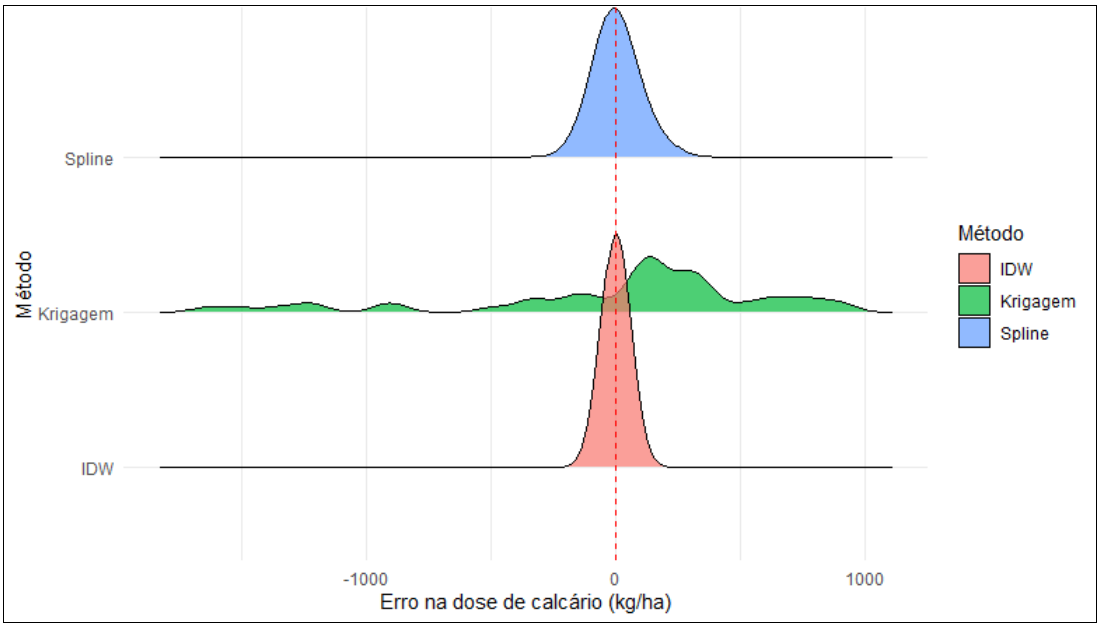
Fonte: Autores (2025)

Observa-se que o método *IDW* (linha azul) apresentou maior oscilação nas doses ao longo do perfil, refletindo sua maior aderência aos valores pontuais amostrados e destacando transições mais abruptas entre classes. O método *spline* (linha preta), embora também evidencie variações locais, apresenta uma suavização intermediária. Por sua vez, a *krigagem* (linha vermelha) resultou em um perfil mais estável, com menor amplitude de variação e transições mais graduais, característica típica de sua estrutura estatística baseada no semivariograma. Agronomicamente, essa suavização pode limitar a precisão em áreas onde a correção da acidez exige doses mais elevadas, podendo levar a subdosagens. Assim, a escolha do método deve considerar o equilíbrio entre continuidade espacial e fidelidade à variabilidade real do solo observada nas amostras.

A redistribuição espacial errônea das doses pelo método da *krigagem* (linha vermelha) pode levar a aplicações desuniforme de calcário, aumentando custos com uma segunda aplicação para correção ou perdas de produtividade (BASSO et al., 2019). A suavização inerente ao método da krigagem, agravada pelo ajuste imperfeito do semivariograma, resultou em subestimativas de doses de calcário em áreas críticas (Figura 4c), onde valores reais chegam a 5000 kg ha^{-1}, mas foram interpolados com valores entre 3200 e 4400 kg ha^{-1}. Essa discrepância tem implicações práticas diretas, tais como, a subdosagens em zonas de alta acidez podem retardar a neutralização do Al^{3+}, limitando a disponibilidade de nutrientes (ex.: Ca^{2+} e Mg^{2+}) e afetando o desenvolvimento radicular das culturas.

A Figura 6 apresenta a distribuição dos erros na predição da dose de calcário para cada um dos três métodos de interpolação avaliados. Os erros foram obtidos por validação cruzada do tipo *Leave-One-Out* (LOOCV), comparando o valor observado com o estimado em cada ponto.

Figura 6 - Distribuição dos erros na dose de calcário (kg ha^{-1}) obtidos a partir da validação cruzada (LOOCV) para os métodos de interpolação IDW, Spline e Krigagem.



Fonte: Autores (2025)

Observa-se que o método IDW apresenta uma distribuição de erro mais concentrada em torno do zero, com formato simétrico e baixo desvio, o que indica boa precisão e menor viés. O método Spline também apresenta distribuição simétrica e concentrada, embora ligeiramente mais dispersa, o que sugere desempenho semelhante ao IDW, mas com menor acurácia. Já a Krigagem apresentou uma distribuição mais irregular e dispersa, com maior variabilidade dos erros e ausência de simetria clara. Esse comportamento pode ser reflexo da suavização do modelo variográfico, que tende a subestimar ou superestimar valores em áreas com alta variabilidade local.

Agronomicamente, uma distribuição de erro estreita e centrada no zero é desejável, pois indica que o método fornece estimativas próximas das reais necessidades de calagem. Assim, os resultados reforçam a superioridade do método IDW neste estudo, tanto do ponto de vista estatístico quanto do ponto de vista da tomada de decisão para a correção da acidez do solo.

A Tabela 2 apresenta o resumo das métricas de erro utilizadas para avaliar o desempenho preditivo dos métodos de interpolação espacial: krigagem, IDW e spline. As métricas analisadas foram o Erro Médio Absoluto (MAE), a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), o Viés (Bias) e o Viés Percentual (Bias %), todas calculadas com base na técnica de validação cruzada *Leave-One-Out* (LOOCV), que consiste em estimar a dose de cada ponto com base nos demais.

Tabela - 2 Resumo das métricas de erro obtidas por validação cruzada (LOOCV) para os métodos de interpolação espacial aplicados à dose de calcário.

Método	MAE (kg ha^{-1})	RMSE (kg ha^{-1})	Bias (kg ha^{-1})	Bias (%)
Krigagem	455,21	608,74	8,86	0,25
IDW	0,09	0,18	0,01	0,00
Spline	61,34	79,49	3,80	0,11

Fonte: Autores (2025)

A interpolação pelo método IDW apresentou o melhor desempenho, com valores extremamente baixos de MAE (0,09 kg ha^{-1}), RMSE (0,18 kg ha^{-1}) e viés praticamente nulo (0,01 kg ha^{-1}). Esses valores indicam elevada precisão e ausência de tendência sistemática de subestimação ou superestimação, o que o torna o método mais confiável para gerar mapas de prescrição de calagem neste estudo.

A interpolação por Spline, embora tenha apresentado desempenho inferior ao IDW, ainda demonstrou boa acurácia, com MAE de 61,34 kg ha^{-1} e RMSE de 79,49 kg ha^{-1}. O viés também foi relativamente baixo (3,80 kg ha^{-1}), indicando que o modelo não comete erros sistemáticos significativos.

Por outro lado, a krigagem foi o método com o pior desempenho, com valores elevados de MAE (455,21 kg ha^{-1}) e RMSE (608,74 kg ha^{-1}). O viés, embora pequeno em termos percentuais (0,25%), também foi o mais alto em valor absoluto (8,86 kg ha^{-1}). Isso pode estar associado ao modelo variográfico adotado, que provavelmente suavizou a variabilidade espacial e resultou em subestimações ou superestimações relevantes em áreas críticas. Além disso, como discutido anteriormente na Figura 6, a distribuição dos erros da krigagem foi mais dispersa e irregular, corroborando os resultados numéricos.

Esses achados reforçam a importância de considerar a estrutura dos dados e a finalidade prática do mapa interpolado ao escolher o método de interpolação mais adequado. No caso específico da recomendação de corretivos como o calcário, onde a precisão local é essencial, o método *IDW* mostrou-se o mais eficiente e tecnicamente apropriado.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem concluir que, embora a Krigagem seja um método geoestatisticamente robusto e fundamentado na teoria de variáveis regionalizadas, sua performance no presente estudo foi inferior à dos métodos determinísticos.

Em contrapartida, o método IDW, seguido pelo Spline, demonstrou maior acurácia na preservação da magnitude dos valores amostrais originais. A fidelidade aos dados coletados fruto de uma amostragem densa e criteriosa (composta por cinco subamostras), mostrou-se decisiva. O IDW, em particular, representou com maior exatidão a heterogeneidade espacial da área, produzindo mapas que refletem de forma mais fidedigna a realidade de campo e, portanto, oferecendo suporte mais confiável para a agricultura de precisão.

Dessa forma, infere-se que a seleção do algoritmo de interpolação ideal não deve ser pautada exclusivamente pela sofisticação estatística, mas sim por uma análise crítica que considere a natureza dos dados, a qualidade da amostragem e, sobretudo, as implicações agronômicas da interpolação. Neste contexto específico, métodos que preservam a variabilidade local, como o IDW, revelaram-se mais adequados para o manejo diferenciado de insumos, assegurando que áreas com demandas elevadas recebam as doses corretas, otimizando custos e evitando perdas de produtividade.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à empresa Farm 360 – Assessoria em Agricultura de Precisão e Digital, pela disponibilização dos dados utilizados neste trabalho. A colaboração foi essencial para o desenvolvimento desta pesquisa e para a aplicação prática dos conceitos discutidos, contribuindo significativamente para a integração entre o meio acadêmico e as demandas reais do campo.

REFERÊNCIAS

BASSO, L. H, et al., **Agricultura de precisão e agricultura digital.** Embrapa Pecuária Sudeste-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2019.

BERNARDI, J. V. E, et al., Aplicação da análise geoestatística para modelagem espacial do mercúrio e matéria orgânica em solos florestais na Amazônia Ocidental. Fronteiras: **Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 4, n. 3, p. 31-46, 2015.

DUCHON, J. Splines minimizing rotation-invariant semi-norms in Sobolev spaces. In: SCHEMPP, W.; ZELLER, K. (Eds.). **Constructive Theory of Functions of Several Variables**. Oberwolfach, Springer Lecture Notes in Mathematics, v. 571, p. 85–100, 1977.

EMBRAPA. *Origem da acidez do solo*. **Agência de Informação Tecnológica – Embrapa**. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/producao/manejo-da-fertilidade-do-solo/origem-da-acidez. Acesso em: 18 set. 2025.

ESRI -Environmental Systems Research Institute Inc. **ArcGis versão 10.1**. EUA: Environmental Systems Research Institute, 2012.

PEREIRA, G.W. et al. Smart-Map: An open-source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging. **Agronomy**, v.12, n.6: 1350, 2022.

ISBN 978-65-990392-6-3

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. **Árvore do Conhecimento**: cana-de-açúcar. Calagem.Ageitec: Agência Embrapa de Informação Tecnológica, Brasília, v. 29, 2022.

SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. ACM '68: Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference,1968. p. 517–524.

VIEIRA, S. R, et al., Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: ALVAREZ VENEGAS, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSETA, L. M. (Ed.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 2, p.1-46, 2002.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. M. **Geoestatística –conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 215p

CAPÍTULO 30

ARRANJOS ESPACIAIS NA CULTURA DA SOJA SOB DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS

Spatial arrangements in soybean crop under different water regimes

Wellington da Silva[1]; Vitor Hugo Agarriberri Dittberner[2]; Ana Luiza Souza Mesquita[1]; Érika Nunes Macedo[1]; Milena Ferreira da Silva Zühl[1]; Taís Gonçalves Pinto[1]; Zanandra Boff de Oliveira[3]; Alberto Eduardo Knies[4]

[1] Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs), Rua Sete de Setembro, nº. 1040, Centro, CEP 96508-010, Cachoeira do Sul - RS, Brasil, e-mail para contato <wellington-silva01@uergs.edu.br>.
[2] Eng. Agr., egresso da Uergs Unidade em Cachoeira do Sul – RS, vitor-dittberner@uergs.edu.br.
[3] Eng. Agrícola., Me. em Ciência do Solo, Drª. em Eng. Agrícola, profª. Adjunta da UFSM Campus Cachoeira do Sul - RS, zanandra.oliveira@ufsm.br.
[4] Eng. Agr., Me. em Ciência do Solo, Dr. em Eng. Agrícola, prof. Adjunto da Uergs Unidade em Cachoeira do Sul - RS, alberto-knies@uergs.edu.br.

RESUMO

A soja é a oleaginosa mais cultivada mundialmente, sendo o Brasil o maior produtor. Este estudo avaliou o efeito de diferentes populações de plantas (160 a 400 mil plantas ha^{-1}) e regimes hídricos (irrigado e sequeiro) sobre o desempenho agronômico da soja, cultivar Brasmax BMX Zeus IPRO, em Cachoeira do Sul–RS, safra 2019/2020. O delineamento foi em blocos casualizados, bifatorial com quatro repetições. Foram analisadas variáveis como número de vagens, grãos por planta, altura, massa de mil grãos e produtividade. A irrigação suplementar (129 mm) foi necessária para compensar o déficit hídrico. Houve interação significativa entre os fatores para vagens e grãos por planta. A população de 240 mil plantas ha^{-1} apresentou maior produtividade, com 5.430,50 Kg ha^{-1} (irrigado) e 3.801,75 Kg ha^{-1} (sequeiro). A irrigação elevou a produtividade média em 50,12%. Conclui-se que o manejo adequado da população de plantas e da irrigação são essenciais para otimizar a produção da soja.

Palavras-chave: População de plantas. Irrigação. Produtividade de grãos.

ABSTRACT

Soybean is the most widely cultivated oilseed worldwide, with Brazil being the largest producer. This study evaluated the effect of different plant populations (160,000 to 400,000 plants ha-1) and water regimes (irrigated and rainfed) on the agronomic performance of soybean cultivar Brasmax BMX Zeus IPRO, in Cachoeira do Sul, RS, in the 2019/2020 harvest. A two-factor randomized block design was used with four replicates. Variables such as number of pods, grains per plant, height, thousand-grain weight, and yield were analyzed. Supplemental irrigation (129 mm) was required to compensate for water deficits. There was a significant interaction between the factors for pods and grains per plant. The population of 240,000 plants ha-1 showed the highest productivity, with 5,430.50 kg ha^{-1} (irrigated) and 3,801.75 kg ha^{-1} (rainfed). Irrigation increased average productivity by 50.12%. It follows that proper plant population management and irrigation are essential to optimize soybean production.

Keywords: Plant population. Irrigation. Grain yield.

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) é a oleaginosa mais cultivada no mundo, sendo o quarto grão mais produzido, após o milho, trigo e arroz, consolidando-se como uma das maiores commodities da atualidade. Em menos de 50 anos, a cultura da soja alcançou posição de destaque no quesito modernização da agricultura, em consequência do desenvolvimento de tecnologias apropriadas às condições de cultivo. O Brasil permanece como o maior produtor mundial, com uma produção estimada de 147,35 milhões de toneladas na safra 2023/24, enquanto os EUA registraram uma produção de 113,34 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2024).

No Estado do Rio Grande do Sul, a safra de soja 2023/2024 é estimada em 19,65 milhões de toneladas, com uma área plantada de 6,76 milhões de hectares. Na cidade de Cachoeira do Sul, a soja é a principal cultura, com 99.596 hectares dedicados ao seu cultivo, representando 31% do total das propriedades rurais produtivas na região (PMCS, 2024).

A cultura da soja é de extrema importância para a economia e o agronegócio brasileiro, e seu grão é o principal produto da agricultura brasileira, fortalecendo a posição do país como um dos principais atores no comércio agrícola mundial. A cultura contribui significativamente para a geração de empregos e para a economia das regiões produtoras, especialmente no interior dos estados das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste (HIRAKURI, 2014).

Além disso, a soja é fundamental para a produção de proteína animal, sendo utilizada na fabricação de rações, o que reforça sua importância na cadeia produtiva (CONAB, 2017). O Brasil, como maior exportador de soja do mundo, desempenha um papel crucial no combate a fome, tanto no território nacional quanto em outras regiões globais (IPEA, 2024).

O clima é um fator determinante para o desenvolvimento da soja. Ele afeta diretamente o controle de pragas, doenças e plantas daninhas, além de influenciar a produtividade e a qualidade dos grãos. Estudos indicam que os eventos climáticos extremos podem impactar significativamente o rendimento da soja, exigindo estratégias de manejo para mitigar esses efeitos, sendo a falta ou excesso hídrico (CONTIERO et al., 2018).

Dentre os fatores climáticos, a disponibilidade hídrica se destaca como um dos mais importantes para a cultura. A água é essencial para o crescimento da soja, especialmente durante os estágios críticos de floração e enchimento de grãos. Sua necessidade hídrica varia ao longo do seu ciclo fenológico, e a falta de água pode limitar o desenvolvimento da planta. O manejo adequado da irrigação é, portanto, vital para garantir uma produção eficiente e sustentável (FREITAS, 2018).

A irrigação na cultura da soja é uma prática agrícola que visa otimizar a produtividade e garantir a estabilidade da produção, especialmente em regiões onde a distribuição de chuvas é irregular. Segundo a Embrapa, a irrigação suplementar é utilizada para complementar a água fornecida pelas chuvas, garantindo que a soja receba a quantidade necessária de água durante seu ciclo de desenvolvimento (FLUMIGNAN, 2015).

O manejo adequado da irrigação é crucial para aplicar a água na quantidade e no momento ideal para a cultura, evitando tanto o déficit quanto o excesso hídrico, que podem comprometer o desenvolvimento das plantas (SILVA, 2020). O uso eficiente da irrigação pode aumentar a produtividade da soja, especialmente em regiões com

chuvas significativas, onde a irrigação é utilizada de forma complementar. Essas práticas de manejo são fundamentais para maximizar o rendimento da soja e garantir a sustentabilidade da produção agrícola.

A população de plantas é um fator que deve ser cuidadosamente manejado para evitar a competição seja por recursos como luz, água e nutrientes. Uma população bem ajustada pode maximizar a produtividade sem comprometer a sanidade das plantas. A interferência entre plantas cultivadas e daninhas também deve ser considerada, pois pode afetar o crescimento e o rendimento da soja (BIFFE, 2018).

O arranjo espacial influencia diretamente a produtividade e a eficiência do uso dos recursos disponíveis no solo. O arranjo espacial mais utilizado para a soja de crescimento indeterminado é um espaçamento entre linhas de 40 a 50 cm, o que tem mostrado os melhores resultados em termos de produtividade (PEREIRA et al., 2021).

Estudos indicam que a redução do espaçamento entre linhas pode aumentar a quantidade de matéria seca acumulada pelas plantas e melhorar o fechamento da área, o que é benéfico para o controle de plantas daninhas e para a conservação da umidade do solo (GARCIA, 2017). O manejo adequado do arranjo espacial pode influenciar variáveis ligadas à produtividade de grãos e aos custos de produção, sendo uma prática de manejo essencial para maximizar o rendimento da soja (HIRAKURI et al., 2017).

Diante da necessidade de estudos que avaliem as respostas da cultura da soja a diferentes arranjos entre plantas com o uso da irrigação, este trabalho teve como objetivo avaliar a resposta da cultura da soja a diferentes populações de plantas e regimes hídricos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido à campo com a cultura da soja no ano agrícola de 2019/2020, na Estação Agronômica da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, localizada no distrito de Três Vendas (29°53’09’’S 53°00’41’’, altitude de 113 m) na cidade de Cachoeira do Sul – RS, na Região Central do Estado do Rio Grande do Sul. O solo da área foi classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico. O clima dessa região, segundo a classificação de Köppen e Thornthwaite, como subtropical úmido (KUINCHTNER; BURIOL, 2001).

Figura 1 - Imagem aérea do local do experimento.



Fonte: Google Earth (2019).

ISBN 978-65-990392-6-3

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados em esquema bifatorial com quatro repetições, constituídos pela combinação de quatro populações de plantas (8, 12, 16 e 20 plantas por m linear, correspondente a 160, 240, 320 e 400 mil plantas ha^{-1}, respectivamente) e, dois regimes hídricos (irrigado e sequeiro). A cultivar de soja utilizada foi a Brasmax BMX Zeus IPRO, de grupo de maturação 5.5, hábito de crescimento indeterminado com médio índice de ramificação.

As parcelas foram constituídas de cinco linhas com espaçamento entre linhas de 0,50m, comprimento de 5m por 2,5m de largura. A semeadura foi realizada dia 22 de novembro de 2019 por meio de semeadora-adubadora tratorizada em sistema de plantio direto, sobre palhada de aveia preta + nabo forrageiro. A adubação foi realizada com base em análise química do solo e seguindo as recomendações da Comissão de Química e Fertilidade do Solo-RS/SC (2016).

Figura 2. Semeadura da área do experimento.



Fonte: Autores (2019).

Para aplicação da irrigação se tomou como base a estimativa de evapotranspiração de referência (ETo) via método FAO Penman-Monteith e, para o cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc) foram utilizados os valores de coeficientes de cultura (Kc) descritos por ALLEN et al. (1998). Quando os tratamentos irrigados atingiam 15 mm de perda em evapotranspiração, aplicava-se a irrigação com valor igual, feita por aspersão de sistema convencional.

Todos os dados meteorológicos que foram necessários para o cálculo da estimativa da ETo proveram de uma estação meteorológica automática situada na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) campos de Cachoeira do Sul.

Durante a ocasião da colheita, foram colhidas cinco plantas de maneira aleatória para se avaliar altura, sendo considerada a distância entre o colo da planta até a extremidade da haste principal, altura até a primeira vagem, obtida pela distância entre o colo da planta até o primeiro legume, e os componentes do rendimento: vagens.$planta^{-1}$, grãos. $vagem^{-1}$ e massa média de 1.000 grãos.

Para a estimativa da produtividade de grãos foram colhidas todas as plantas dentro de uma área composta das três linhas centrais com comprimento de 2 m de cada parcela, sendo assim 3 m^2. As plantas foram triladas, conforme figura 3, depois os grãos foram limpos, pesados e determinado sua umidade, corrigindo-se o peso para umidade de 13% e, extrapolados para uma área de 10.000 m^2 (1 hectare).

Os dados foram submetidos a análise de variância e, quando houveram diferenças significativas, as médias dos tratamentos qualitativos (regimes hídricos) foram comparados pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro e, os tratamentos quantitativos (populações de plantas) foi apresentada a equação de tendência e o coeficiente de determinação (R^2), sendo todas análises realizadas com auxílio do software estatístico Sisvar.

Figura 3 - Colheita da área experimental.



Fonte: Autores (2020).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de parâmetros de balanço hídrico são apresentados na tabela 1. A irrigação total foi de 129 mm e foi aplicada para suplementar as chuvas que somaram 312 mm ao longo do ciclo, constatando que estas foram insuficientes para suprir a evapotranspiração da cultura de 325 mm e manter o armazenamento de água no solo em níveis desejados. As chuvas ocorreram durante boa parte da primavera e, a partir da segunda quinzena de novembro, houve escassez de chuvas, caracterizando uma das maiores estiagens do Estado do RS (IRGA, 2020). Segundo a Emater/RS-Ascar (2020), ocorreram perdas médias de produtividade em função do déficit hídrico de 55% no município de Cachoeira do Sul.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 1 - Parâmetros do balanço hídrico da cultura da soja do experimento.

Etapa do ciclo	ETc (mm)	Irrigação (mm)	Chuva (mm)
Inicial	13	12	16
Rápido crescimento	98	39	100
Médio	177	66	172
Final	37	12	24
Total	325	129	312

Onde: ETc = evapotranspiração da cultura. Fonte: Autores (2024).

Na tabela 2 são apresentados os resultados dos indicadores estatísticos do experimento. Conforme pode-se observar, houve efeito de interação entre a população de plantas e regimes hídricos no número de vagens por planta e número de grãos por planta. O fator população de plantas diferiu significativamente para as variáveis número de vagens por planta, altura de primeira vagem, número de grão por planta e massa de mil grãos. Já o fator regime hídrico apresentou efeito significativo para grãos por vagem, altura de planta e produtividade de grãos.

Tabela 2 - Indicadores estatísticos para as variáveis respostas obtidas em função dos fatores avaliados do experimento.

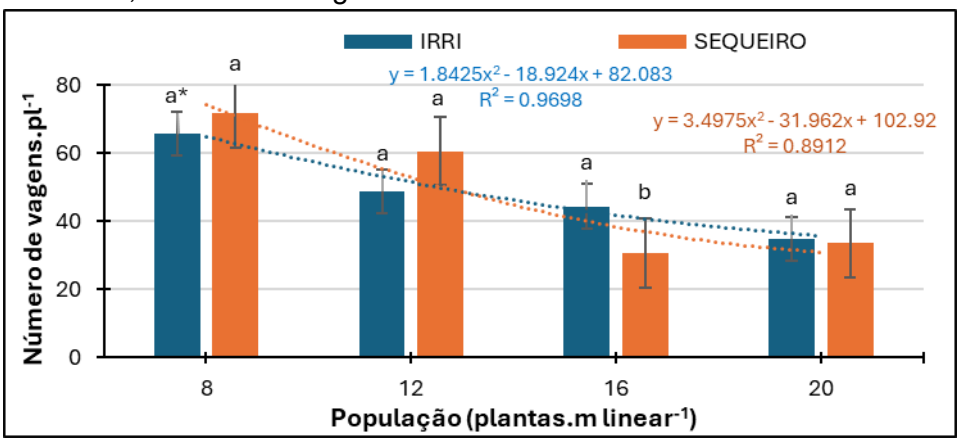
Fatores	NVP.	Gra.	AP	A1°V	NGP	MMG	Prod.
Pop	0,00*	$0,71^{ns}$	$0,49^{ns}$	0,00*	0,00*	0,00*	$0,54^{ns}$
Reg.Hidr	$0,83^{ns}$	0,01*	0,00*	$0,13^{ns}$	$0,55^{ns}$	$0,46^{ns}$	0,00*
Pop x Reg.Hidr	0,04*	$0,12^{ns}$	$0,12^{ns}$	$0,42^{ns}$	0,01*	$0,37^{ns}$	$0,96^{ns}$
CV (%)	17,57	5,18	7,04	13,53	14,32	6,14	13,01
DMS	12,63	0,18	11,20	3,79	24,52	17,18	842,06

Onde: Pop: população; Man.Hidr: Regimes hídricos; PML x Reg.Hidr: Análise da interação dos fatores sobre a variável resposta. *Efeito significativo, quando Pr<0,05. ns Efeito não significativo, quando Pr>0,05. CV: Coeficiente de Variação (%); DMS: Diferença Mínima Significativa. NVP: número de vagens por planta; Gra: grãos por vagem; AP: altura de planta; A1°V: altura primeira vagem; NGP: número de grãos por planta; MMG: massa de mil grãos; Prod: produtividade de grãos. Fonte: Autores (2024).

Pode-se observar na figura 4 que a população de 8 plantas por metro linear sob regime hídrico de sequeiro alcançou a maior média com 71,81, ainda que não apresentou diferença estatística entre os regimes hídricos. Segundo Deretti et al. (2019) a redução da população de plantas gera um aumento no número de vagens por planta, geralmente oriundas dos ramos. Mauad et al. (2010) também obteve resultados onde o número de vagens decresceu em relação ao aumento da população de plantas.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 4 - Número de vagens por planta da cultura da soja sob as populações de 160, 240, 320 e 400 mil plantas ha^{-1} correspondente a 8, 12, 16 e 20 plantas por m linear, respectivamente, e diferentes regimes hídricos.



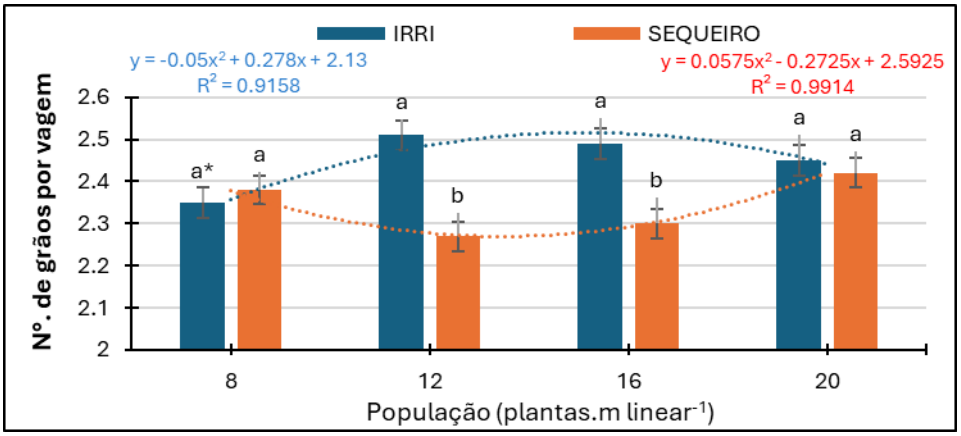
*Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo Teste de Tukey (p<0,05).
Fonte: Autores (2024).

Com o regime irrigado apresentando média de 44,50 vagens.planta^{-1} enquanto o regime de sequeiro teve uma média de 30,75 vagens.planta^{-1}. Mesmo sem diferença significativa na população de 20 plantas por metro linear podemos observar um incremento ao comparar o regime irrigado com o regime sequeiro isso sugere que a irrigação pode ser mais benéfica em populações mais altas, onde a competição por recursos é maior. As demais populações não apresentaram diferenças significativas entre si.

O número de vagens por planta é um componente crucial da produtividade da soja, sendo diretamente relacionado com o potencial de rendimento, a capacidade de uma planta em produzir mais vagens pode ser influenciada fortemente por fatores genéticos, ambientais e de manejo, como população de plantas e disponibilidade de água (BARBOSA et al., 2021).

A figura 5 exibe os dados do número de grãos por vagem da cultura da soja sob diferentes populações e regimes hídricos.

Figura 5 - Número de grãos por vagem da cultura da soja sob as populações de 160, 240, 320 e 400 mil plantas ha^{-1} correspondente a 8, 12, 16 e 20 plantas por m linear, respectivamente, e diferentes regimes hídricos.



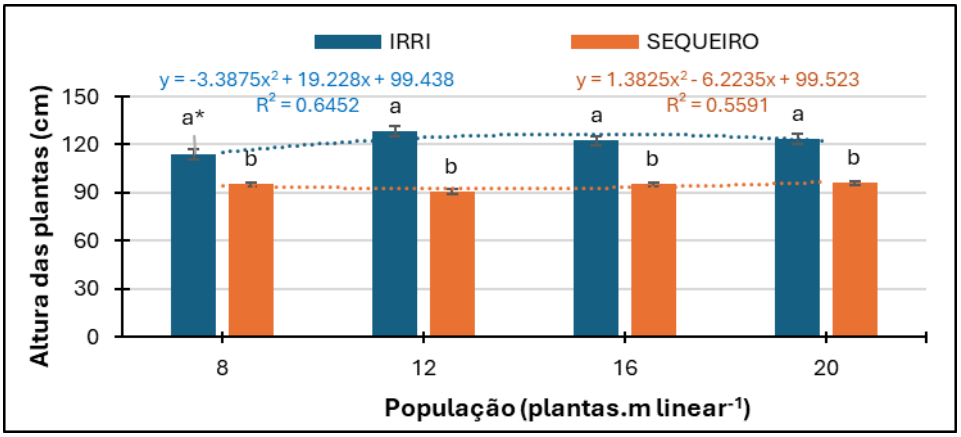
*Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo Teste Tukey (p<0,05).
Fonte: Autores (2024).

ISBN 978-65-990392-6-3

Observa-se na figura 5 que o regime hídrico irrigado obteve os maiores valores de número de grãos por vagem nas populações de 12 e 16 plantas m linear^{-1}, com média de 2,5 grãos por vagem. Nas populações de 8 e 20 plantas m linear^{-1} não houve diferença entre os regimes hídricos.

A figura 6 exibe a altura das plantas sob diferentes condições de população de plantas e regimes hídricos. A população de 12 plantas por metro linear apresentou a maior altura média sob regime irrigado com 128,57cm, não foi observado acamamento em nenhuma das parcelas.

Figura 6 - Altura das plantas da cultura da soja sob as populações de 160, 240, 320 e 400 mil plantas ha^{-1} correspondente a 8, 12, 16 e 20 plantas por m linear, respectivamente, e diferentes regimes hídricos.



*Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo Teste Tukey (p<0,05).
Fonte: Autores (2024).

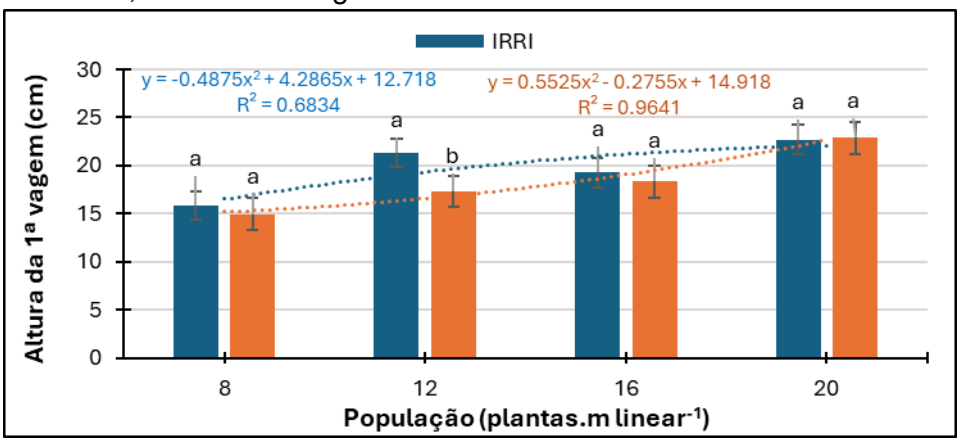
Pode-se observar na figura 6 que todas as plantas sob regime hídrico irrigado foram mais altas do que aquelas sob regime de sequeiro, independentemente da população de plantas, o que indica que a irrigação pode promover um crescimento mais vigoroso das plantas. Plantas mais altas podem ter uma melhor circulação do ar diminuindo a umidade que favorece o surgimento de doenças fúngicas.

Em estudo realizado por Ruviaro et al. (2011), foi constatado que a irrigação está diretamente ligada à altura de plantas ao proporcionar condições ideias para que cultura expresse seu potencial fenotípico.

Pode-se observar um incremento praticamente linear da altura da primeira vagem das plantas com o aumento da população de plantas (figura 7). Foi observado efeito do regime hídrico apenas na população de 12 plantas m linear^{-1}.

Resultados semelhantes foram encontrados por Mauad et al. (2010), que observaram incremento da altura da primeira vagem conforme aumentaram a densidade de semeadura. Este fator é importante para a regulagem da altura de corte da plataforma da colhedora, buscando mitigar perdas na colheita.

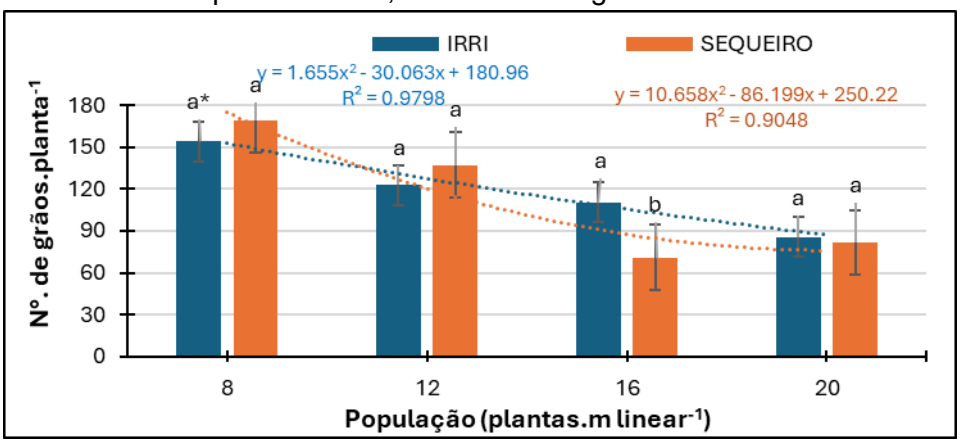
Figura 7 - Altura da primeira vagem da cultura da soja sob as populações de 160, 240, 320 e 400 mil plantas ha^{-1} correspondente a 8, 12, 16 e 20 plantas por m linear, respectivamente, e diferentes regimes hídricos.



*Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo Teste Tukey (p<0,05).
Fonte: Autores (2024).

A figura 8 apresenta a variação do número de grãos por planta da cultura da soja sob diferentes populações e regimes hídricos. Pode-se observar, que de maneira geral, houve redução do número grãos por planta com o aumento da população de plantas, independente do regime hídrico. Foi observado diferença dos regimes hídricos apenas na população de 16 plantas m linear. Mauad et al. (2010), observaram uma resposta linear negativa no número de grãos por planta conforme progredia o aumento da densidade de semeadura.

Figura 8. Número de grãos por planta da cultura da soja sob as populações de 160, 240, 320 e 400 mil plantas ha^{-1} correspondente a 8, 12, 16 e 20 plantas por m linear, respectivamente, e diferentes regimes hídricos.



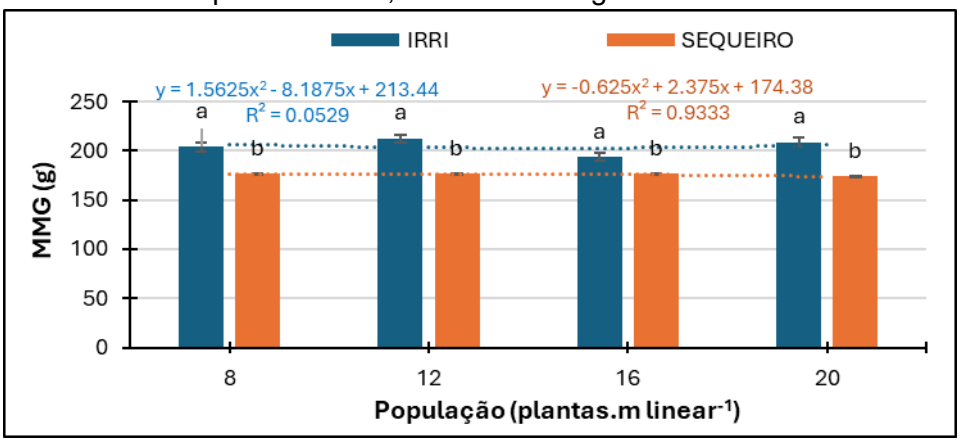
*Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo Teste Tukey (p<0,05).
Fonte: Autores (2024).

Em relação a massa de mil grãos (MMG, figura 9), pode-se observar maiores valores no regime irrigado com diferença significativa em todas as populações, sendo a maior média de 212,50 g.1000 grãos^{-1} com 12 plantas por metro linear. Isso destaca a importância da irrigação para maximizar a produtividade em termos de peso dos grãos. Estudos realizados por Rambo et al. (2002), constataram que a irrigação teve influência positiva direta sobre a massa do grão, o que corrobora com os dados deste

ISBN 978-65-990392-6-3

experimento. No regime hídrico de sequeiro há uma uniformidade da massa de mil grãos nas diferentes populações de plantas avaliadas, com média de 175 g.1000 grãos^{-1},

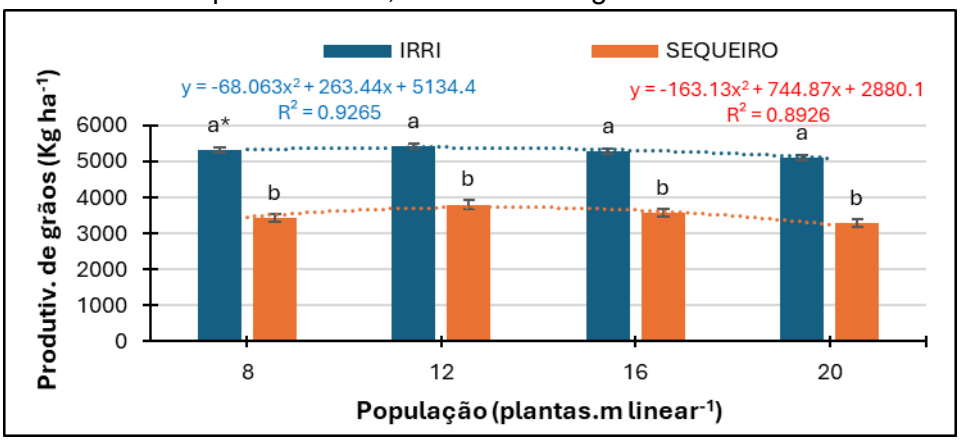
Figura 9 - Massa de mil grãos (MMG) da cultura da soja sob as populações de 160, 240, 320 e 400 mil plantas ha^{-1} correspondente a 8, 12, 16 e 20 plantas por m linear, respectivamente, e diferentes regimes hídricos.



*Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo Teste Tukey (p<0,05).
Fonte: Autores (2024).

Na figura 10 observa-se que a produtividade é maior sob regime irrigado em todas as populações, com diferenças significativas em relação ao regime de sequeiro. A produtividade média do regime irrigado foi de 5.282,56 Kg ha^{-1}, enquanto do regime hídrico de sequeiro foi de 3.518,88 Kg ha^{-1}, ou seja, a irrigação proporcionou um incremento de 50,12 % na produtividade de grãos.

Figura 10 - Produtividade de grãos da cultura da soja sob as populações de 160, 240, 320 e 400 mil plantas ha^{-1} correspondente a 8, 12, 16 e 20 plantas por m linear, respectivamente, e diferentes regimes hídricos.



*Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo Teste Tukey (p<0,05).
Fonte: Autores (2024).

Segundo Oliveira et al. (2021), avaliando a produtividade de cultivares de soja em 2 anos agrícolas em condições semelhantes a este experimento, encontraram produtividade média de 4.475,5 Kg ha^{-1} para a soja irrigada e de 3.690 Kg ha^{-1} para a

soja de sequeiro, ou seja, um incremento de 21,23 % na produtividade devido a utilização da irrigação.

Em relação a população de plantas, pode-se observar que a população de 12 plantas m linear^{-1} (240 mil plantas ha^{-1}) resultou em maior produtividade de grãos, tanto no regime irrigado (5.430,50 Kg ha^{-1}) como no de sequeiro (3.801,75 Kg ha^{-1}).

Em trabalho conduzido por Ramos Júnior et al. (2020), com 2 cultivares e diferentes populações de plantas, encontraram aumento na produtividade de grãos com o incremento na densidade de semeadura até 380 mil plantas por hectare, sendo que, na menor densidade, observou-se produtividade de grãos de 3.140 Kg ha^{-1} e, na maior densidade, 3.390 Kg ha^{-1}.

4 CONCLUSÃO

Nas condições edafoclimáticas deste estudo, a população de 12 plantas m linear^{-1} (240 mil plantas ha^{-1}) resultou em maior produtividade de grãos da cultivar de soja Brasmax BMX Zeus IPRO, tanto no regime irrigado (5.430,50 Kg ha^{-1}) como no de sequeiro (3.801,75 Kg ha^{-1}).

A produtividade média do regime irrigado foi de 5.282,56 Kg ha^{-1}, enquanto do regime de sequeiro foi de 3.518,88 Kg ha^{-1}, ou seja, a irrigação proporcionou um incremento de 50,12 % na produtividade de grãos.

Portanto, a adoção de estratégias de manejo da cultura da soja que integrem a utilização da irrigação e a correta população de plantas são essenciais para a busca da sustentabilidade e a maximização da produção desta cultura.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a Universidade Estadual do Rio Grande do Sul pela disponibilização da Estação Agronômica para realização do experimento.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, Jaildo Ribeiro; FILHO, João Valdenor Pereira; OLIVEIRA, Valdir Moura de, SOUSA, Geocleber Gomes de; GOES, Geovana Ferreira; LEITE, Kelly Nascimento. Produtividade da cultura da soja irrigada com déficit hídrico regulado no cerrado piauiense. **Rev. Bras. Agric. Irr**. v.14, n.4, Fortaleza, p. 4200 - 4210, Jul – Ago, 2020.

BIFFE, D.F., CONSTANTIN, J., and OLIVEIRA JUNIOR, R.S. Interferência das plantas daninhas nas plantas cultivadas. In: BRANDÃO FILHO, J.U.T., FREITAS, P.S.L., BERIAN, L.O.S., and GOTO, R., comps. **Hortaliças-fruto** [online]. Maringá: EDUEM, 2018, pp. 339-355. ISBN: 978-65-86383-01-0.

CONTIERO, R.L., BIFFE, D.F., and CATAPAN, V. Tecnologia de Aplicação. In: BRANDÃO FILHO, J.U.T., FREITAS, P.S.L., BERIAN, L.O.S., and GOTO, R., comps. **Hortaliças-fruto** [online]. Maringá: EDUEM, 2018, pp. 401-449.

DERETTI, André Felipe Hermann et al. Response of soybean cultivars to the reduction of plant density in the northern plateau of Santa Catarina. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 21, n. 2, p. 123-136, 2022. DOI: 10.5965/223811712122022123. Disponível em: https://www.revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/21217. Acesso em: 2 dez. 2024.

EMATER/RS-ASCAR. Safra de verão 2020-2021. **Estimativas iniciais de área, produtividade e produção. Setembro, 2020**. Disponível em: http://www.emater.tche.br/site/arquivos_pdf/safra/safraTabela_10092020.pdf. Acesso em: 15 de maio, 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Dados econômicos** - Portal Embrapa. Disponível em: https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos. Acesso em: 15 set. 2024.

FREITAS, P.S.L., DALLACORT, R., BARBIERI, J.D., and BERTONHA, A. Manejo de água. In: BRANDÃO FILHO, J.U.T., FREITAS, P.S.L., BERIAN, L.O.S., and GOTO, R., comps. **Hortaliças-fruto** [online]. Maringá: EDUEM, 2018, pp. 163-208. ISBN: 978-65-86383-01-0.

GARCIA, Rodrigo Arroyo, PROCÓPIO, Sérgio de Oliveira, JUNIOR, Alvadi Antonio Balbinot. **Produção de Soja em Diferentes Arranjos Espaciais de Plantas no Paraná e em Mato Grosso do Sul**. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1082959/1/DOC2017140.pdf. Acessado em 25 set. 2024.

HIRAKURI, Marcelo Hiroshi; LAZZAROTTO, Joelsio José. **O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro**. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/104753/1/O-agronegocio-da-soja-nos-contextos-mundial-e-brasileiro.pdf. Acesso em: 15 set. 2024.

IRGA (INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ). **Relatório sobre a estiagem na safra 2019/2020**. Disponível em: https://irga.rs.gov.br/relatorio-sobre-a-estiagem-da-safra-2019-2020. Acesso em: 14 nov. 2024.

MAUAD, M.; BERTOLOZE SILVA, T. L.; ALMEIDA NETO, A. I.; ABREU, V. G. Influência da densidade de semeadura sobre características agronômicas na cultura da soja. **Agrarian**, v. 3, n. 9, p. 175-181, 2011. Disponível em: https://ojs.ufgd.edu.br/agrarian/article/view/75. Acesso em: 02 dez. 2024.

OLIVEIRA, Z. B., KNIES, A. E., BOTTEGA, E. L., DA SILVA, C. M., GOMES, J. I. T. Influência da irrigação suplementar na produtividade de cultivares de soja para a safra e safrinha 2018-19 e 2019-20 na Região Central do RS. **Brazilian Journal of Development**, n. 7, v. 2, p. 15580–15595, 2021.

PEREIRA, André Ferreira; SILVA, Alessandro Guerra da; CAMPOS, Leonardo José Motta; SILVA NETO, Sebastião Pedro da. **Respostas de soja a diferentes arranjos de plantas nas regiões Centro-oeste e Norte do Brasil**. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1141845/1/Doc-379-Andre.pdf. Acesso em: 30 out. 2024.

PMCS - PREFEITURA MUNICIPAL DE CACHOEIRA DO SUL. **Cachoeira tem 2.780 estabelecimentos rurais produtivos**. Disponível em: https://www.cachoeiradosul.rs.gov.br/portal/noticias/0/3/1932/cachoeira-tem-2780-

ISBN 978-65-990392-6-3

estabelecimentos-rurais-produtivos. Acesso em: 30 out. 2024.

RAMOS JUNIOR, E. U.; RAMOS, E. M.; BULHÕES, C. C. Densidade de plantas nos componentes produtivos e produtividade de cultivares de soja. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, n. 17, v. 2, p. 51-56, 2020.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 31

DESEMPENHO DA CULTURA DO MILHO EM FUNÇÃO DE DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS E ESPAÇAMENTOS ENTRE LINHAS

Analysis of corn cropping performance according to different row spacing and water regimes

Milena Ferreira da Silva Zühl[1]; Felipe Cherobini[2]; Ana Luiza Souza Mesquita[1]; Érika Nunes Macedo[1]; Richard Massirer Prochnow[1]; Wellington da Silva[1]; Zanandra Boff de Oliveira[3]; Alberto Eduardo Knies[4]

[1] Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs), Rua Sete de Setembro, nº. 1040, Centro, CEP 96508-010, Cachoeira do Sul - RS, Brasil, e-mail para contato milena-zuhl@uergs.edu.br.
[2] Eng. Agr., egresso da Uergs Unidade em Cachoeira do Sul – RS, felipe-cherobini@uergs.edu.br.
[3] Eng. Agrícola., Me. em Ciência do Solo, Drª. em Eng. Agrícola, profª. Adjunta da UFSM Campus Cachoeira do Sul - RS, zanandra.oliveira@ufsm.br.
[4] Eng. Agr., Me. em Ciência do Solo, Dr. em Eng. Agrícola, prof. Adjunto da Uergs Unidade em Cachoeira do Sul - RS, alberto-knies@uergs.edu.br.

RESUMO

A busca de altas produtividades e redução de custos é fundamental na produção da cultura do milho. Diante disso, esse trabalho tem como objetivo determinar o efeito da utilização de diferentes espaçamentos entre linhas e regimes hídricos no desempenho da cultura do milho. Um trabalho foi conduzido a campo na Estação Agronômica da Uergs em Cachoeira do Sul-RS, em delineamento experimental inteiramente casualizado com parcelas subdivididas e 4 repetições, em esquema bifatorial, sendo o fator A constituído por dois regimes hídricos (sequeiro e irrigado) e, o fator D por três espaçamentos entre linhas (22,5; 45 e 90 cm), com mesma densidade de semeadura. O uso da irrigação promoveu resultados superiores em todas as variáveis analisadas. A maior produtividade de grãos foi observada no espaçamento de 22,5 cm irrigado, com produtividade de 9.396,29 Kg ha^{-1}, sendo 24,55 % superior ao espaçamento de 90 cm. Enquanto que, no regime hídrico de sequeiro a produtividade foi maior e semelhante nos espaçamentos de 22,5 e 45 cm, sendo em média 36,37% superior ao espaçamento de 90 cm.

Palavras-chave: Semeadura. Distribuição de plantas. Irrigação.

ABSTRACT

The pursuit of high productivity and cost reduction is essential in corn production. Therefore, this study aims to determine the effect of using different row spacing and water regimes on corn crop performance. The study was conducted in the field at the Uergs Agronomic Station in Cachoeira do Sul, RS, using a randomized split-plot design with four replications with split plots and four replicates, in a two-factor scheme. Factor A consisted of two water regimes (rainfed and irrigated) and Factor D consisted of three row spacings (22.5, 45, and 90 cm), with the same seeding density. Regarding row spacing, the highest grain yield was observed with the 22.5 cm spacing, with a yield of 9,396.29 kg ha^{-1}, 24.55% higher than the 90 cm spacing.

ISBN 978-65-990392-6-3

Meanwhile, in the rainfed regime, productivity was higher and similar in the spacings of 22.5 and 45 cm, being on average 36.37% higher than the spacing of 90 cm.

Keywords: Sowing. Plant distribution. Irrigation.

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays L.*) é umas das mais importantes plantas produzidas mundialmente do ponto de vista econômico e social. Os primeiros registros da cultura datam de 7.300 anos atrás, encontrados em pequenas ilhas próximas ao litoral Mexicano. Seu nome, de origem indígena caribenha, significa "sustento da vida" (LERAYER, 2006). Nas últimas décadas, o milho alcançou o patamar de maior cereal agrícola mundial, ultrapassado a marca de 1 bilhão de toneladas, superando antigos concorrentes, como o arroz e o trigo (MIRANDA, 2018).

Utilizado para alimentação humana, alimentação animal, biodiesel entre outros produtos industriais, o milho atualmente é cultivado em todas as microrregiões do Brasil, o que torna o país o terceiro maior produtor mundial do cereal, sendo que na safra passada produziu aproximadamente 90 milhões de toneladas do cereal (AGROLINK, 2017; ALVES et al., 2015).

No Brasil, o milho tem sido cultivado em diferentes regiões, de clima frio até em regiões de clima quente, com baixas altitudes e latitudes, gerando diferentes potenciais de produtividade. Para alavancar a produtividade da cultura, os produtores brasileiros estão a cada dia buscando formas de reduzir os custos de produção e aumentar a produtividade do grão consorciado com a preservação do meio ambiente. O estudo dessa dinâmica das áreas cultivadas, da produção e da produtividade é de suma importância para definir ações de manejo e tecnologias entre as regiões produtoras de milho.

Segundo Flénet et al. (1996), a utilização de menores espaçamentos entre linhas permite melhor distribuição espacial das plantas de milho, aumentando a eficiência na intercepção da luz. Esse fator pode refletir em incrementos de rendimento de grãos (MURPHY et al., 1996; NASCIMENTO et al., 2012). A elevação do rendimento de grãos com a redução do espaçamento entre linhas é atribuída à melhor eficiência na intercepção de radiação e ao decréscimo de competição entre plantas de milho por luz, água e nutrientes, em virtude da distribuição mais equidistante das plantas (JOHNSON et al.,1998; BUSO et al., 2016), ou seja, o aumento da fotossíntese líquida (BULLOCK et al., 1988).

Além dos efeitos observados na cultura do milho, a redução do espaçamento entre linhas pode aumentar a sua competitividade com as plantas daninhas, a partir da maior quantidade de luz que é interceptada pelo dossel da cultura (TEASDALE,1995). O uso de tecnologias inadequadas é um dos fatores que acarretam em baixas produtividades. Desta forma, há a necessidade de aumentar a média de produtividade de cada região, através de medidas que levam suporte e informação ao campo. Torna-se necessário investir em tecnologias que visam explorar o potencial produtivo da cultura do milho, de forma economicamente acessível e eficaz.

As técnicas de manejo da água são de grande importância para potencializar a produção da cultura do milho, além de fazer o uso eficiente da água em função da escassez dos recursos hídricos (CUNHA et al., 2013). A lâmina de água necessária

para a cultura deve atender às exigências hídricas das plantas em todo seu ciclo de desenvolvimento, que varia de acordo com o estádio fenológico pela maior evapotranspiração (KÖPP et al., 2015).

A condição hídrica das plantas causa diversas alterações morfofisiológicas no milho interferindo na eficiência fotossintética e nos seus parâmetros produtivos (SAH et al., 2020). O déficit hídrico nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura acarreta em problemas de crescimento e rendimento como redução número de espigas por planta e o número de grãos por espiga (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). Em fases críticas como o florescimento e formação dos grãos, o déficit hídrico de 20%, pode levar a redução de 50% da produtividade de grãos (DOORENBOS et al., 1986).

A necessidade hídrica da cultura do milho pode variar em uma demanda de 400 a 700 mm durante todo ciclo biológico, porém o milho pode ser inserido em regiões que possuem uma precipitação pluviométrica anual muito variada, de 450 a 2000 mm (CPTEC/INPE, 2023). O milho possui várias fases fenológicas críticas ao déficit hídrico, como os estádios V4 e V9 onde ocorre a as fases de diferenciação floral e definição dos componentes iniciais de produção, estádio de florescimento VT a R1 e estádios R2 a R4, quando ocorre a formação e enchimento de grãos (RITCHIE et al., 1993).

A cultura do milho era tradicionalmente cultivada no Brasil com espaçamentos entre linhas de 0,80 e 0,90 m, o que possibilita adequado funcionamento dos equipamentos tradicionais à semeadura, tratos culturais e colheita (MATTOSO et al., 2006). A tendência atual é a redução do espaçamento entre linhas, de forma a modificar o comportamento da planta e interferir na eficácia de utilização dos recursos do meio, mantendo-se a densidade de plantas constante.

A redução do espaçamento entre linhas, tem como vantagens o incremento na distância entre as plantas na linha, proporcionando um arranjo mais equidistante dos indivíduos na área de cultivo, o que possibilita redução na competição entre as plantas por água, por luz e nutrientes (ALVAREZ et al., 2006), limitando, por sua vez, o desenvolvimento de plantas daninhas, pela redução de transmissão de luz no dossel vegetal (BALBINOT; FLECK, 2005).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da utilização de diferentes espaçamentos entre linhas e regimes hídricos no desempenho da cultura do milho.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em um experimento à campo durante o ano agrícola 2021/22 com a cultura do milho na área experimental da Estação Agronômica da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs), localizada no distrito de Três Vendas na cidade de Cachoeira do Sul – RS. O clima da região é classificado por Köppen (1931) como subtropical úmido, predominante na região sul do Brasil. A altitude do local é de 115 m e o solo é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2025).

Foi utilizado em delineamento experimental inteiramente casualizado com parcelas subdivididas e 4 repetições, em esquema bifatorial, sendo o fator A

ISBN 978-65-990392-6-3

constituído por dois regimes hídricos (sequeiro e irrigado) e, o fator D por três espaçamentos entre linhas (22,5; 45 e 90 cm) (Figura 1). A densidade de sementes permaneceu a mesma, apenas alterou-se o espaçamento entre linhas. As dimensões das parcelas foram de 6 m de comprimento e aproximadamente 2,5 metros de largura, com um intervalo de 12 m de largura entre os tratamentos irrigados e de sequeiro. A semeadura foi realizada no dia 29 de novembro de 2021 sobre palhada de trigo, dessecada 15 dias antes da semeadura (figura 1).

A cultivar escolhida foi o híbrido Forseed FS 533 PWU de ciclo precoce com densidade de semeadura de 75.000 sementes ha^{-1}, objetivando 70.000 plantas ha^{-1}. A adubação de base seguiu o indicado pelo laudo da análise química do solo e as recomendações da Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC (2016), com aplicação de 225 Kg ha^{-1} de nitrogênio por hectare, dividido em 2 aplicações, sendo 50 % nos estágios V3-V4 e os outros 50 % em V7-V8. Os tratos culturais, como o controle de plantas daninhas, pragas e doenças foram realizadas conforme as recomendações técnicas para a cultura (EICHOLZ. et al., 2020). Na figura 2 observa-se as plantas em estágio vegetativo de desenvolvimento.

Figura 1. Semeadura do experimento com a cultura do milho.



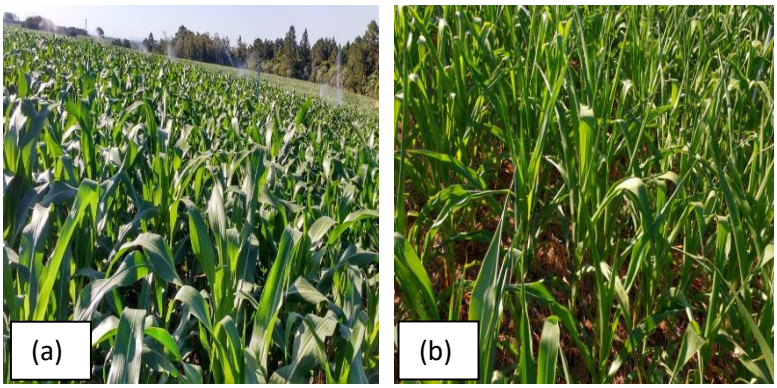
Fonte: Autores (2023).

A irrigação foi manejada com base na estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) calculada pelo método FAO-Penman-Monteith, utilizando os dados meteorológicos de uma estação meteorológica automática instalada próximo ao local do experimento. Para o cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc) foram utilizados os valores de coeficientes de cultura (Kc) recomendados por Allen et al. (1998). Para os tratamentos irrigados, o sistema de irrigação foi acionado quando a ETc acumulada atingia 15 mm, aplicando-se igual valor. O manejo de irrigação foi realizado por um sistema de aspersão convencional, com taxa de aplicação de 12 mm h^{-1}.

Para as avaliações, foram amostradas 3 plantas por parcela, as quais foram medidas a altura (distância da superfície do solo até o último nó na haste principal da planta), a altura até a primeira espiga (distância da superfície do solo até a primeira espiga) e os seguintes componentes do rendimento:massa de 1.000 grãos, número de grãos por fileira, número de fileiras por espiga, e número de espigas por m^2.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2. Experimento com as plantas de milho em estágio vegetativo, nos regimes hídricos irrigado (a) e sequeiro (b).



Fonte: Autores (2023).

O rendimento de grãos, foi obtido através da colheita em cada unidade experimental de: 4 linhas de plantas com 2 m de comprimento, no espaçamento 0,225 m entre linhas; 3 linhas com 2 m de comprimento, no espaçamento 0,45 m entre linhas e, 2 linhas com 2 m de comprimento, no espaçamento 0,9 m entre linhas. Foi realizada a debulha das espigas, pesagem dos grãos da área colhida, correção do peso em função da umidade (ajustada para 13%) e os resultados foram extrapolados para hectare.

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) utilizando o software Sisvar 5.0 e, as médias estatisticamente significativas pelo teste F foram discriminados pelo teste t em nível de 5% de probabilidade de erro para o fator qualitativo (regimes hídricos). Para o fator quantitativo (espaçamentos entre linhas), realizou-se análise de regressão, testando-se modelos polinomiais e selecionando-se o de melhor ajuste.

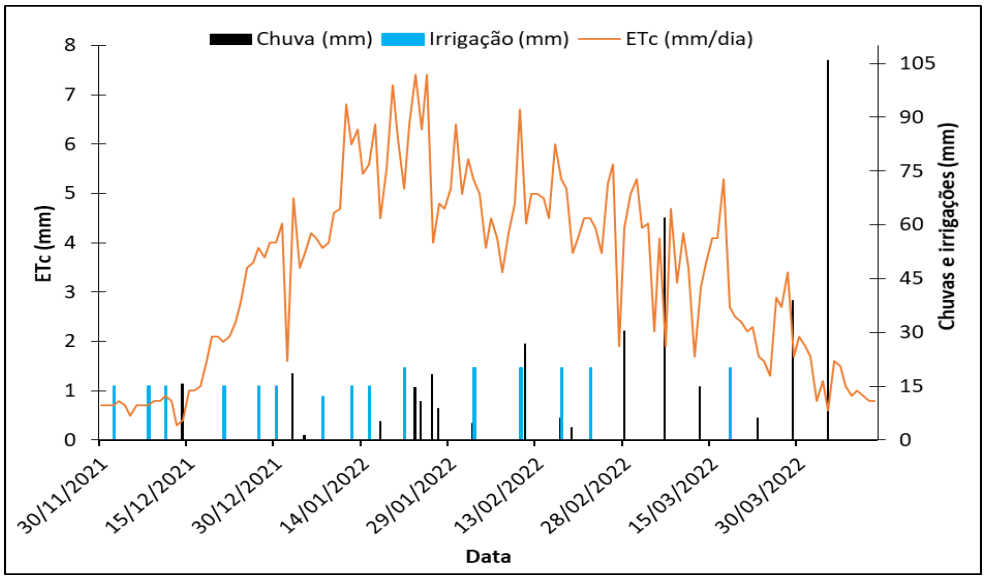
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o ciclo da cultura do milho, podemos observar baixo volume de chuvas, principalmente durante o período de estabelecimento até o mês de fevereiro (figura 3). Esse período coincide com o início da fase reprodutiva da cultura, o estádio de florescimento, onde a cultura apresenta um elevado consumo de água. Essa irregularidade de chuvas pode impactar negativamente nos componentes de rendimento da cultura, pois na fase de estabelecimento reduz o estande de plantas e na fase de floração impactando no número de grãos por espiga.

A germinação das sementes pode ser severamente afetada pela baixa disponibilidade de água (SOARES et al. 2015), isso pode acarretar em prejuízos irreversíveis, sendo um dos estádios mais críticos do ciclo de vida da planta (ALMANSOURI et al., 2001). De acordo com Khajeh-Hosseini et al. (2003), a água constitui a matriz onde ocorre a maioria dos processos bioquímicos e fisiológicos, desta forma, efeitos da disponibilidade hídrica se prolongam após a emergência do eixo embrionário, com reflexos sobre o desenvolvimento das plântulas. No estádio de florescimento, o déficit hídrico reduz o sincronismo do florescimento masculino e feminino, podendo levar a perdas de produtividade entre 35 e 50% (SANTOS et al., 2020)

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 3. Parâmetros do balanço hídrico do experimento com a cultura do milho.



Fonte: Autores (2023).

Durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho foram registrados um total de 394 mm de chuva. A ETc acumulada no período foi de 524,40 mm e uma necessidade total de 15 irrigações suplementares, totalizando 252 mm (figura 3). O volume de chuva registrado durante o ciclo da cultura foi inferior à demanda hídrica da cultura que é de 400 a 700 mm (CPTEC/INPE, 2023). A ETc acumulada vai ao encontro com o encontrado por Fan et al. (2017), que registrou valores de ETc de 509 a 570 mm para a cultura do milho.

Na tabela 1 estão dispostos os indicadores estatísticos para as diferentes variáveis respostas avaliadas na cultura do milho. O fator “regime hídrico” apresentou diferença significativa em todas as variáveis analisadas, enquanto que, o fator “espaçamento entre linhas” apresentou diferença significativa para as variáveis altura de planta, altura de inserção de espiga, número de grãos por fileira e produtividade de grãos. A interação dos fatores “regime hídrico” e “espaçamento entre linhas” apresentaram diferença significativa apenas sobre a variável produtividade. Também, é possível destacar o baixo coeficiente de variação (CV) das variáveis analisadas, indicando qualidade e rigor na condução e coleta de dados do experimento.

A suplementação hídrica com a irrigação apresentou resultados positivos na avaliação da altura das plantas (figura 4). Quanto aos espaçamentos entre linhas, foi observada altura das plantas de 2,46 m no espaçamento de 45 cm e de 2,41 m no espaçamento de 90 cm. Resultados semelhantes foram obtidos por Scheeren et al. (2004) e Lana et al. (2009), que verificaram nos espaçamentos de 0,45, 0,75 e 0,90 m entre linhas que, quanto maior o espaçamento, maior a altura das plantas. A ocorrência do déficit hídrico na cultura do milho além de causar a redução da produtividade, reduz a altura de plantas e o diâmetro do colmo. Isso ocorre em função da redução da fotossíntese causada pelo decréscimo na expansão celular e pelos danos causados no aparato fotossintético (GUIMARÃES et al., 2019).

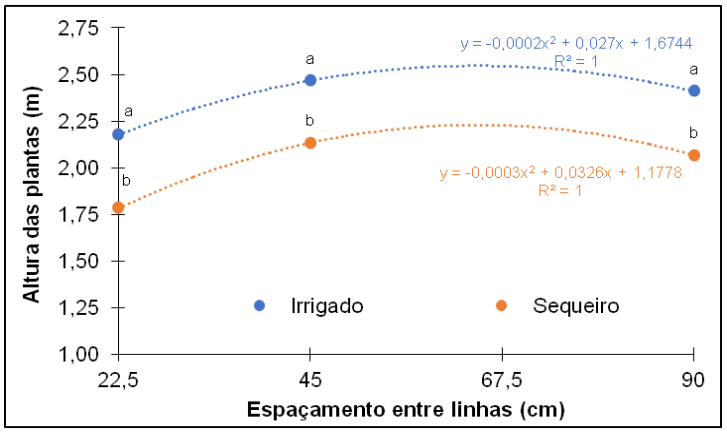
Tabela 1. Indicadores estatísticos para as variáveis respostas obtidas em função dos fatores avaliados.

Fatores	Variáveis analisadas						
	Alt.	AIE	CE	NFE	NGF	MMG	Prod.
A	0,00*	0,00*	0,00*	0,01*	0,01*	0,00*	0,00*
D	0,00*	0,00*	0,24^{ns}	0,34^{ns}	0,03*	0,43^{ns}	0,00*
A x D	0,85^{ns}	0,46^{ns}	0,38^{ns}	0,34^{ns}	0,24^{ns}	0,11^{ns}	0,00*
Rep.	0,84	0,88	0,96	0,84	0,79	0,02	8,83
CV (%)	4,39	8,68	6,69	6,63	5,96	2,40	6,33
DMS	0,10	1,12	1,27	1,19	2,22	10,27	505,46

Legenda: A: Regime hídrico; D: Espaçamento entre linhas; A x D: Análise da interação dos fatores sobre a variável resposta. *Efeito significativo, quando Pr < 0,05. ^{ns} Efeito não significativo, quando Pr >0,05. Rep.: Repetição; CV: Coeficiente de Variação (%); DMS: Diferença Mínima Significativa. Alt.: alturas das plantas; AIE: Altura de inserção de espiga. CE: Comprimento de Espiga. NFE: Numero de Fileiras por Espiga. NGF: Numero de grãos por Fileira. MMG: massa de mil grãos; e, Prod. produtividade de grãos. Fonte: Autores (2025).

Na avaliação da altura de inserção da espiga, houve diferença significativa em ambos os fatores de avaliação, regime hídrico e espaçamento entre linhas (figura 5). De acordo com Sangoi et al. (2002), a redução do espaçamento entre linhas leva a ocorrência de dominância apical, consequentemente, espigas inseridas em pontos mais altos do colmo.

Figura 4. Altura das plantas da cultura do milho em função de diferentes regimes hídricos e espaçamentos entre linhas.

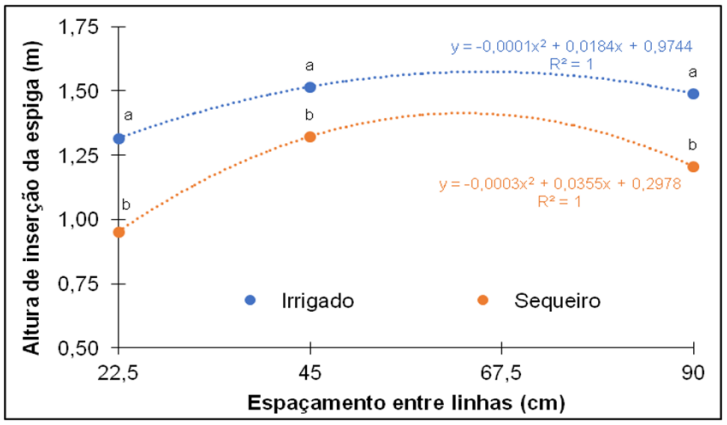


* Médias seguidas por letras diferentes para um mesmo espaçamento entre linhas diferem entre si, pelo teste t em nível de 5 % de probabilidade de erro. Fonte: Autor (2024).

O comprimento de espiga não teve diferença significativa quando comparado os diferentes espaçamentos entre linhas, no entanto, quanto ao regime hídrico houve um aumento significativo (figura 6). Os valores observados se aproximam dos encontrados por Paiva Júnior et al. (2001), que obtiveram 20,80; 19,74 e 21,30 cm de comprimento de espiga. Em estudo realizado por Dourado Neto et al. (2003), observaram redução no comprimento de espiga pelo aumento na população de plantas em função do aumento da competição intraespecífica por água, nutrientes e luminosidade.

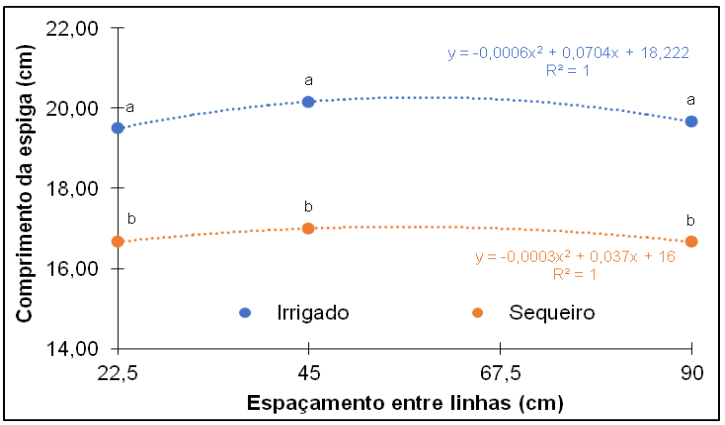
ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 5. Altura de inserção da espiga da cultura do milho em função de diferentes regimes hídricos e espaçamentos entre linhas.



* Médias seguidas por letras diferentes para um mesmo espaçamento entre linhas diferem entre si, pelo teste t em nível de 5 % de probabilidade de erro. Fonte: Autor (2024).

Figura 6. Comprimento da espiga da cultura do milho em função de diferentes regimes hídricos e espaçamentos entre linhas.



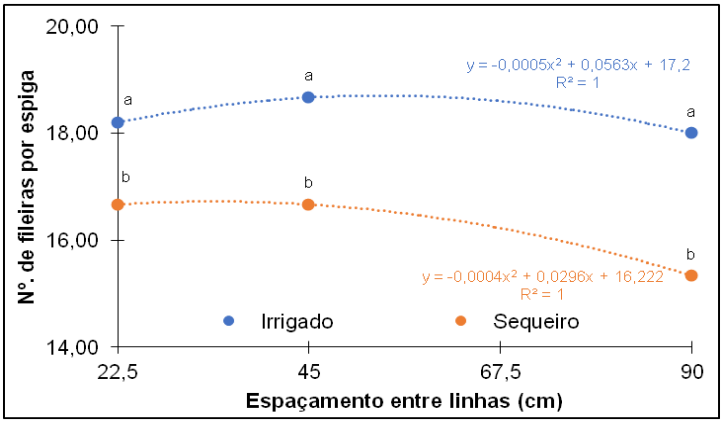
* Médias seguidas por letras diferentes para um mesmo espaçamento entre linhas diferem entre si, pelo teste t em nível de 5 % de probabilidade de erro. Fonte: Autor (2024).

Nota-se que o número de fileiras de grãos por espiga tem uma redução com o aumento do espaçamento entre linhas (figura 7). Nielsen (2007) afirma que o número de fileiras de grãos nas espigas é determinado fortemente pelo genótipo e não pelo ambiente. No entanto, pode-se observar que houve influência dos fatores tanto espaçamento entre linhas quanto regime hídrico. Já Balbinot Júnior et al. (2005), observaram que o componente número de fileiras por espiga explica 47 % das variações de produtividade de grãos.

Houve pouca interação entre o fator espaçamento entre linhas no número de grãos por fileira no regime hídrico irrigado, sendo observado maior influência no regime de sequeiro, tendo maior número de grãos por fileiras no espaçamento de 90 cm (figura 8). Esse fato pode ser explicado pela redução da competição intraespecífica em maior espaçamento entre linhas, tendo maior disponibilidade de água para as plantas. De acordo com Nielsen (2007), o número de grãos é afetado por estresses ambientais, o que torna o fator variável em função das condições do meio. O número de grãos por espiga é definido em uma a duas semanas após a polinização (NIELSEN, 2005).

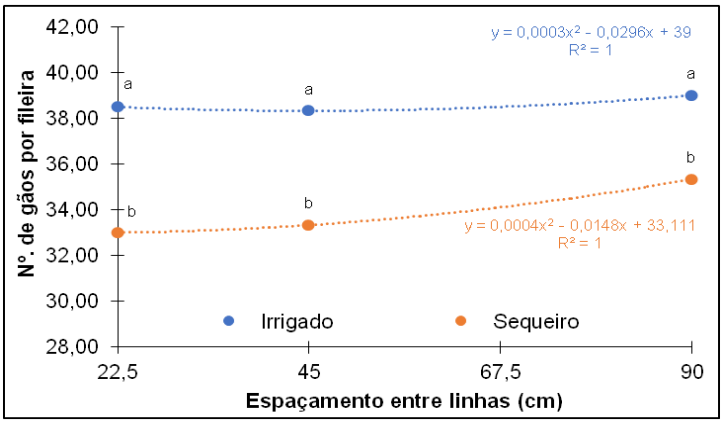
ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 7. Número de fileiras de grãos por espiga da cultura do milho em função de diferentes regimes hídricos e espaçamento entre linhas.



* Médias seguidas por letras diferentes para um mesmo espaçamento entre linhas diferem entre si, pelo teste t em nível de 5 % de probabilidade de erro. Fonte: Autor (2025).

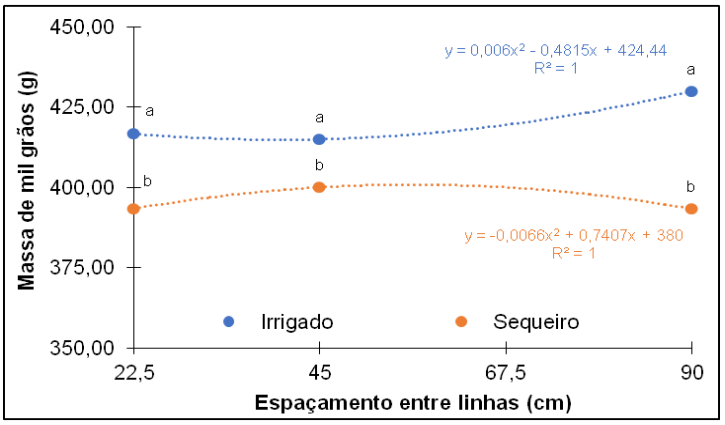
Figura 8. Número de grãos por fileira da espiga da cultura o milho em função de diferentes regimes hídricos e espaçamentos entre linhas.



* Médias seguidas por letras diferentes para um mesmo espaçamento entre linhas diferem entre si, pelo teste t em nível de 5 % de probabilidade de erro. Fonte: Autor (2025).

A MMG foi em torno de 10 % maior nas plantas submetidas ao regime hídrico irrigado, quando comparado às de sequeiro (figura 9). Isto ocorre porque quando tem uma condição de boa disponibilidade hídrica para as plantas há melhores condições de suprimento de fotoassimilados para o desenvolvimento dos grãos (MATZENAUER et al., 2002). Houve pouca variação da MMG em função dos diferentes espaçamentos entre linhas avaliados. A massa de grãos é um componente de rendimento determinado ao longo do período de enchimento de grãos, influenciado principalmente pela nutrição e fatores ambientais (NIELSEN, 2005).

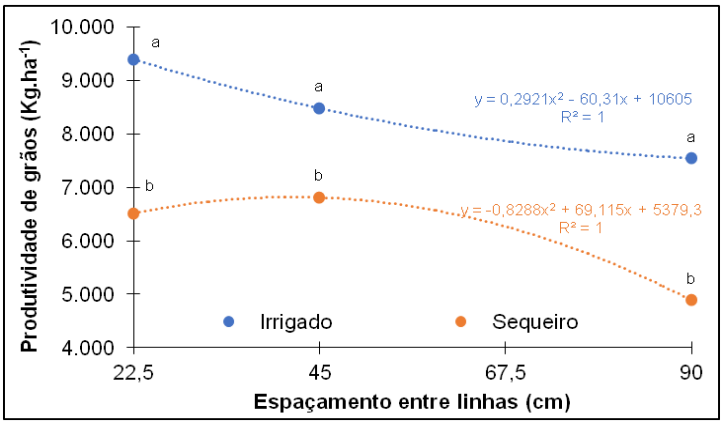
Figura 9. Massa de mil grãos (MMG) da cultura o milho em função de diferentes regimes hídricos e espaçamentos entre linhas.



* Médias seguidas por letras diferentes para um mesmo espaçamento entre linhas diferem entre si, pelo teste t em nível de 5 % de probabilidade de erro. Fonte: Autor (2025).

A produtividade de grãos variou significativamente tanto em função do fator de regime hídrico quanto em relação aos espaçamentos entre linhas, sendo que, quanto menor o espaçamento utilizado maior a produtividade de grãos (figura 10). A maior produtividade de grãos foi observada no espaçamento entre linhas de 22 cm no regime hídrico irrigado, com produtividade de 9.396,29 Kg ha^{-1}, sendo 24,55 % superior ao espaçamento de 90 cm. Enquanto que, no regime hídrico se sequeiro a produtividade foi maior e semelhante nos espaçamentos de 22,5 e 45 cm, sendo em média 36,37% superior ao espaçamento de 90 cm.

Figura 10: Produtividade de grãos da cultura o milho em função de diferentes regimes hídricos e espaçamentos entre linhas.



* Médias seguidas por letras diferentes para um mesmo espaçamento entre linhas diferem entre si, pelo teste t em nível de 5 % de probabilidade de erro. Fonte: Autor (2025).

Segundo Silva et al. (2010), a redução no espaçamento entre linhas resulta em aumento da produtividade em função da distribuição mais homogênea do sistema radicular, ocupando maior volume de solo, favorecendo o aproveitamento da água e nutrientes. Segundo Teixeira et al. (2007), a diminuição do espaçamento entre linhas no cultivo de milho de 80 para 45 cm proporcionou aumento da produtividade de grãos. Em relação à irrigação, Pimentel et al. (2019) afirma que o uso de irrigação

pode aumentar a produtividade do milho em até 90% quando comparado com o sistema de sequeiro.

Embora o milho seja uma das mais eficientes plantas armazenadoras de energia existentes na natureza, devido à sua grande capacidade de acumulação de fotoassimilados (BALDO, 2007), grandes perdas na produtividade do milho são causadas por estresses hídricos. Essas perdas são potencializadas principalmente quando o estresse ocorre entre duas semanas antes e duas semanas após o espigamento (BERGAMASCHI et al., 2014).

Em estudos conduzidos por Melo et al. (2018), verificaram que a irrigação influencia positivamente nos componentes de crescimento e produtividade do milho, alcançando produtividades superiores aos alcançados em áreas de sequeiro. Pavinato et al. (2008), também afirmam que a maior produtividade de grãos é verificada em condições de ambientes irrigados, podendo observar redução dessa eficiência em condições de sequeiro.

Avaliando a produtividade do milho em diferentes espaçamentos, Vieira e Artunes (2018) e Ferreira, Junior (2018), encontraram maior produtividade de grãos para em espaçamento entre linhas de 45 cm justificando que neste espaçamento, se tem uma menor competição interespecífica, o que pode ser explicado pela menor penetração de luz no dossel, reduzindo a competição por recursos naturais.

4 CONCLUSÃO

O uso do regime hídrico irrigado necessitou 15 irrigações suplementares, totalizando 252 mm, promovendo resultados superiores na altura das plantas, altura de inserção das espigas, comprimento da espiga, número de fileiras e de grãos por fileira, na massa de mil grãos e produtividade de grãos.

A redução do espaçamento entre linhas resultou em incrementos na produtividade de grãos da cultura do milho em ambos os regimes hídricos avaliados. A maior produtividade de grãos foi observada no espaçamento entre linhas de 22 cm no regime hídrico irrigado, com produtividade de 9.396,29 Kg ha^{-1}, sendo 24,55 % superior ao espaçamento de 90 cm. Enquanto que, no regime hídrico se sequeiro a produtividade foi maior e semelhante nos espaçamentos de 22,5 e 45 cm, sendo em média 36,37% superior ao espaçamento de 90 cm.

Diante destes resultados, podemos afirmar que a redução do espaçamento entre linhas de cultivo da cultura do milho é uma importante ferramenta, que associada a irrigação constituem uma excelente opção para a busca de sistemas mais produtivos, com sustentabilidade econômica e ambiental. Estudos futuros devem avaliar o arranjo de plantas em diferentes cultivares, ambientes e condições de manejo para ampliar a abrangência dos resultados.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a Universidade Estadual do Rio Grande do Sul pela disponibilização da Estação Agronômica para realização do experimento.

ISBN 978-65-990392-6-3

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G. et al. **Crop evapotranspiration**: guidlines for computing crop water requirements. Roma: FAO - 56, 1998. 300p.

ALMANSOURI, M.; KINET, J. M.; LUTTS, S. Effect of salt and osmotic stresses on germination in durum wheat (Triticum durum Desf.). **Plant and Soil**, v. 231, n. 2, p. 243-254. 2001.

ALVAREZ, C.G.D.; PINHO, R.G.; BORGES, I.D. Avaliação de características agronômicas e de produção de forragens e grãos de milho em diferentes densidades de semeadura e espaçamentos entre linhas. **Ciência e Agrotecnologia**, v.30, p.402-408, 2006.

ALVAREZ, R. C. F.. Análise de crescimento e produtividade de cultivares de arroz de terras altas dos tipos tradicional, intermediário e moderno. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.42, n.4, p.397-406, 2012.

ALVES, B. M.; CARGNELUTTI FILHO, A.; TOEBE, C. B. M.. Divergência genética de milho transgênico em relação à produtividade de grãos e da qualidade nutricional. **Ciência Rural**, v.45, n.5, p.884-891, 2015.

ANDRADE, J. A. C.; MIRANDA FILHO, J. B.. Quantitative variation in the tropical maize population. **Scientia Agrícola**, v.65, n.2, p.174-182.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; SANGOI, L. Arranjo de plantas em milho: análise do estado-da-arte. **Ciência Rural**, v.31, n.6, p.1075-1084, 2001.

ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F. da: BORTOLINI, C.G.; FORSTHOFER, E.L.; MANJABOSCO, E.A.; BEHEREGARAY NETO, V. Resposta de híbridos simples de milho à redução do espaçamento entre linhas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol. 36, n. 1, Brasília, DF, 2001.

ARTUZO, F. D.; FOGUESATTO, C. R.; SILVA, L. X. Agricultura de precisão: inovação para a produção mundial de alimentos e otimização de insumos agrícolas. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 13, n. 29, p. 146-161, 2017.

BALBINOT, A.A.; FLECK, N.G. Benefício e limitações da redução do espaçamento entre linhas. **Revista Plantio Direto**, v.5, p.37-41, 2005.ADEBAYO, M. A.; MENKIR, A.; BLAY, E.; GRACEN, V.; DANQUAH, E.; HEARNE, S. Genetic analysis of drought tolerance in adapted x exotic crosses of maize inbred lines under managed stress conditions. **Euphytica, Ikenne**, v.196,n.2, p.261-270,2014. DOI: 10.1007/s10681-013-1029-5.

BALDO, M.N. **Comportamento anatômico, fisiológico e agronômico do milho (Zea mays L.) submetido a estresses de ambiente em diferentes estádios fenológicos**. 2007. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007

BERGAMASCHI, H. et al. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, V.39, p.831-839, 2004.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RSAscar. 2014. 84p

BULLOCK, D. G.; NIELSEN, R. L.; NYQUIST, W. E. Agrowth analysis comparison of corn grown in conventional and equidistant plant spacing. **Crop Science, Madison**, v. 28, n. 2, p. 254-258, 1988.

BUSO, W. H. D., Silva, L. B., Rios, A. D. F., & Firmiano, R. S. (2016). Corn agronomic characteristics according to crop year, spacing and plant population densities. **Comunicata Scientiae**, 7(2), 197-203.

DOURADO NETO, D. et al. Efeito da população de plantas e do espaçamento sobre a produtividade de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.2, n.3, p.63-77, 2003.

DURÃES, F. O.; GOMES, E. E.; GAMA, M. X. D. S.;SANTOS, F. G.; COELHO, A. M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; CARLOS, A. **Fenotipagem associada à tolerância a seca em milho para uso em melhoramento, estudos genômicos e seleção assistida por marcadores**. Sete Lagoas: Embrapa, 2004.(Circular Técnica, 39).

FAN, Y.; DING, R.; KANG, S.; HAO, X.; DU, T.; TONG, L.; LI, S. Plastic mulch decreases available energy and evapotranspiration and improves yield and water use efficiency in an irrigated maize cropland. **Agricultural Water Management**, Elsevier, vol. 179(C), pages 122-131, 2017.

FANCELLI, A. L.. Milho: ambiente e produtividade. In: FANCELLI, A. L; DOURADO NETO, D.. **Milho estratégias e manejo para alta produtividade**. Piracicaba: Departamento de Produção Vegetal, 2003. p.174-197.

FAVRO, J.; CARAVIERI, A. M. M.; MARCONATO, M.; NASCIMENTO, S. P.; CAMARA, M. R. G.; CALDARELLI, E. **Análise da Evolução da Produtividade do Milho em Estados Selecionados no Brasil nos Anos de 2001 e 2011**. Economia e Região, v. 3, n. 2, p. 25-45, 2015.

FLÉNET, F.; KINIRY, J. R.; BOARD, J. E.; WESTGATE, M. E.; REICOSKY, D. C. Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean, and sunflower. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 2, p. 185-190, 1996.

GILO, E. G.; SILVA JUNIOR, C. A.; TORRES, F. E.; NASCIMENTO, E. S.; LOURENÇÃO, A. S. Comportamento de híbridos de milho no cerrado sul-matogrossense, sob diferentes espaçamentos entre linhas. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 6, p. 908-914, 2011.

GUIMARÃES, P. S.; ROCHA, D. S.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z. Conteúdo de carboidrato foliar em híbridos de milho submetidos à restrição hídrica. **Evidencia**, Joacaba, v.19, n.2, p.93-112, 2019. DOI: 10.18593/eba.v19i1.2001.

GUIMARÃES, P. S.; ROCHA, D. S.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z. Conteúdo de carboidrato foliar em híbridos de milho submetidos à restrição hídrica. **Evidencia**, Joacaba, v. 19, n. 2, p. 93-112, 2019. DOI: 10.18593/eba.v19i1.20201.

JOHNSON, G. A.; HOVERSTAD, T. R.; GREENWALD, R. E. Integrated weed management using narrow corn row spacing, herbicides, and cultivation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 90, n.1, p. 40-46, 1998.

KÖPPEN, W. P. (1931). **Grundriss der klimakunde** (Outline of climate science). Walter de Gruyter, Berlin, 388p.

LANA, M. C.; WOYTICHOSKI JUNIOR, P. P.; BRACCINI, A. L.; SCAPIM, C. A.; AVILA, M. R.; ALBRECHT, L. P. Arranjo espacial e adubação nitrogenada em cobertura na cultura do milho. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, n. 03, p. 433-438, 2009.

LERAYER, A.. **Guia do milho**: tecnologia do campo à mesa. CIB.

MARCHÃO, R. L.; BRASIL, E. M.; DUARTE, J. B.; GUIMARÃES, C. M.; GOMES, J. A. Densidade de plantas e características agronômicas de híbridos de milho sob espaçamento reduzido entre linhas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 35, n.2, p. 93-101, 2005.

MATTOSO, M.J.; GARCIA, L.C.; DUARTE, J.O.; CRUZ, J.C. Aspectos de produção e mercado do milho. **Informe Agropecuário**, v.27, p.95-104, 2006.

MELO,A. V.;SANTOS, V. M.; VARANDA, M. A. F.;CARDOSO, D. P.; DIAS, M. A. R. Desempenho agronômico de genótipos de milho submetidos ao estresse hídrico no Sul do Estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 17, n. 2, p. 177-189, 2018.DOI:10.18512/1980-6477/rbms.v17n2p177-189.

MIRANDA, R. A.. Uma história de sucesso da civilização. **A Granja**, v.74, n.829, p.24-27, 2018.

MURPHY, S. D.; YAKUBU, Y.; WEISE, S. F.; SWANTON, C. J. Effect of planting patterns on intrarow cultivation and competition between corn and late emerging weeds. **Weed Science, Champaign**, v. 44, n. 6, p. 856-870, 1996.

NASCIMENTO, E. S.; GILO, E. G.; TORRES, F. E.; SILVA JÚNIOR, C. A.; OLIVEIRA, L. V. A.; LOURENÇÃO, A. S. Resposta de híbridos de milho a diferentes espaçamentos entre linhas. **Nucleus**, v. 9, p. 131-140, 2012

NIELSEN, R. L. **Ear size determination in corn**. Corny News Network Articles, Purdue University, 2007.

NIELSEN, R. L. **Kernel set scuttlebutt**. Corny News Network, West Lafayette, IN. 23 2005.

OLIVEIRA, F. A.; MEDEIROS, J. F.; ALVES, R. C.; LIMA, L. A.; SANTOS, S. T.; RÉGIS, L. R. L. Produção de feijão caupi em função da salinidade e regulador de crescimento. **Revista Brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v.19, n.11, 2015. http://dx.doi.org/10.1590/18071929/agriambi. v19n11p1049-1056.

PAIVA JÚNIOR, M. C. de; PINHO, R. G. von; PINHO, E. V. R. von; RESENDE, S. G. de. Desempenho de cultivares para a produção de milho verde em diferentes épocas e densidades de semeadura em Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 5, p. 1235-1247, set./out. 2001.

SANTOS, H. G, JACOMINE, P. K. T., ANJOS, L. H. C., OLIVEIRA, V. A., LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R. ET AL. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 6th ed. Embrapa, Brasília. 393p. 2025.

SANTOS, R. L. V.; BARBOSA, J. P. F.; SOUZA, W. C. L.; SILVA, L. E. B.; BRITO, D. R.; BRITO, D. B. Rendimento do híbrido de milho (ZeamaysL.) AG 1051 sob diferentes populações de plantas em irrigação deficitária por gotejamento no Agreste Alagoano.

Revista da Universidade Estadual de Alagoas,[S. l.],v.12, n.12, p. 1-9, 2020. DOI: 10.34032/ambientale.v12i1.190.

SANTOS, R. L. V.; BARBOSA, J. P. F.; SOUZA, W. C. L.; SILVA, L. E. B.; BRITO, D. R.; BRITO, D. B. Rendimento do híbrido de milho (ZeamaysL.) AG 1051 sob diferentes populações de plantas em irrigação deficitária por gotejamento no Agreste Alagoano. **Revista da Universidade Estadual de Alagoas**,[S. l.],v.12, n.12, p. 1-9, 2020. DOI: 10.34032/ambientale.v12i1.190.

SCHEEREN, B. R.; BAZONI, R.; BONO, J. A.; ARIAS, S. S.; OLIVEIRA, R.; SALOMÃO, L. Arranjo populacional para a cultura do milho na região central do Estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.26, n.2, p. 55-60, 2004.

SILVA, P. R. F.; PIANA, A. T.; MAASS, L. B.; SERPA, M. S.; SANGOI, L.; VIEIRA, V. M.; ENDRIGO, P. C.; JANDREY, D. B. Adequação da densidade de plantas à época de semeadura em milho irrigado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 9, p. 48-57, 2010

SOARES, M. M.; SANTOS JUNIOR, H. C.; SIMÕES, M. G.; PAZZIN, D.; SILVA, L. L. Estresse hídrico e salino em sementes de soja classificadas em diferentes tamanhos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia-GO, v. 45, n. 4, p.370-378, 2015.

SOUZA, R. O.; TEIXEIRA, S. M. Produtividade Total dos Fatores na Agricultura Goiana: Uma Análise para as Culturas de Cana-de-açúcar, Milho e Soja. **Revista de Economia e Agronegócio-REA**, v. 11, n. 2, p. 211-234, 2015.

TEASDALE, J. R. Influence of corn (Zea mays) population and row spacing on corn and velvetleaf (Abutilon theophrasti) yield. **Weed Science**, Champaign, v. 46, n. 4, p. 447-453, 1998.

TEIXEIRA, M. C. C.; EMYGDIO, B. M.; RODRIGUES, O. **Desempenho de híbridos simples de milho cultivados em diferentes espaçamentos entre linhas e densidades de plantas**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2007. 7 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Online, 47).

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 32

EVOLUÇÃO DOS TEORES DE PH E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO DE UM TALHÃO MANEJADO COM FERRAMENTAS DA AGRICULTURA DE PRECISÃO

Evolution of soil pH and organic matter content on land managed with Precision Agriculture tools

Emanoel Rolim Farias da Silva[1]; Guilherme Scapin Muniz[1]; Lucas Steffanello[1]; Lucas Cagliari Grando[1]; Ivan Carlos Maldaner[1]; Marcelo Silveira de Farias[1]; Jaqueline Sgarbossa[1] Luciano Zucuni Pes[1]
[1]Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria-RS, Brasil; emanoelrolim80@gmail.com; guilhermesmuniz160@gmail.com; lucas06steffanello@gmail.com; lucas.grando@telusagcg.com; ivan.maldaner@ufsm.br; marcelo.farias@ufsm.br; sgarbossa.jaqueline@ufsm.br; lucianopes@politecnico.ufsm.br

RESUMO

Os solos das áreas agrícolas do sul do Brasil apresentam grande diversidade de características físicas, químicas e biológicas. A evolução dos níveis de fertilidade, ao longo dos anos, é essencial para compreender as alterações resultantes do manejo agrícola e orientar práticas sustentáveis de uso do solo. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a evolução dos teores de pH e matéria orgânica do solo em um talhão agrícola manejado com ferramentas da Agricultura de Precisão. Os resultados evidenciaram que a aplicação de calcário a taxa variável, o uso de plantas de cobertura, a semeadura em nível e a rotação de culturas possuem potencial de melhorar os teores de pH e de matéria orgânica do solo. Conclui-se que o monitoramento contínuo dos atributos do solo e o emprego de práticas de manejo, aliadas à Agricultura de Precisão, melhoram os teores de pH e matéria orgânica, sendo importantes estratégias para aumentar a sustentabilidade do sistema de produção de grãos.

Palavras-chave: Manejo do solo. Taxa variada. Agricultura de precisão.

ABSTRACT

The soils of agricultural areas in southern Brazil exhibit a wide variety of physical, chemical, and biological characteristics. The evolution of fertility levels over time is essential for understanding changes resulting from agricultural management and guiding sustainable land use practices. In this context, this study aimed to evaluate the evolution of soil pH and organic matter levels in an agricultural field managed with Precision Agriculture tools. The results showed that variable-rate lime application, the use of cover crops, contour seeding, and crop rotation have the potential to improve soil pH and organic matter levels. It is concluded that continuous monitoring of soil attributes and the use of management practices, combined with Precision Agriculture, improve pH and organic matter levels, representing important strategies for increasing the sustainability of the grain production system.

Keywords: Soil management. Variable rate. Precision farming.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura possui relevante importância a nível mundial, por ser a base para a alimentação humana e pela forte capacidade de movimentação econômica (Melo et

ISBN 978-65-990392-6-3

al., 2022). No Brasil, a agricultura ocupa importante papel na geração de renda e consequentemente de empregos, representando cerca de 25% do PIB (Produto Interno Bruto) do país (EMBRAPA, 2023).

A Agricultura de Precisão (AP) vem sendo utilizada como ferramenta de manejo do solo, sendo uma forma de aprimoramento das técnicas produtivas em determinadas operações agrícolas, como a semeadura, pulverização, irrigação e distribuição de fertilizantes e corretivos, permitindo a correção do talhão em determinados níveis pré-estabelecidos (BASSOI et al., 2019).

O solo apresenta acentuada variação espacial de atributos químicos ao longo dos talhões agrícolas devido a inúmeros fatores, relacionados ao seu processo de formação, reações que acontecem na solução do solo e manejo realizado (CAVALCANTE et al., 2007). É fundamental a devida identificação dessa variabilidade, visando o aprimoramento de técnicas e realização de manejos assertivos (LIMA et al., 2014; SANCHEZ et al., 2009).

Compreender a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo é essencial para otimizar a aplicação localizada de corretivos e fertilizantes. Isso não apenas diminui a degradação ambiental causada pelo uso excessivo desses insumos, mas também melhora o controle do sistema de produção das culturas. (SOUZA et al., 2004; SILVA et al., 2008).

Para a identificação de variabilidade do solo é essencial que haja um número de amostragem adequado da área em estudo, visando a representatividade e coerência na geração dos dados (MONTANARI et al., 2005). Posteriormente, é feita a interpolação e análise através da geoestatística, possibilitando a obtenção de mapas temáticos das condições do solo no talhão e o estabelecimento da melhor metodologia de manejo (CHERUBIN et al., 2011).

Segundo o estudo de Resende et al. (2014), a partir da elaboração de mapas com atributos químicos do solo, torna-se possível definir mapas específicos para aplicação de corretivos e fertilizantes em doses variáveis, ajustadas conforme as diferenças nos níveis de fertilidade observadas entre as diversas regiões do talhão. Isso permite que cada parte da área receba a quantidade adequada de insumos, de acordo com sua necessidade específica. Aliado a isso, ocorre o uso racional dos insumos, evitando a ocorrência de desbalanços nutricionais a longo prazo (Bernardi et al., 2017).

Conforme Inamasu e Bernardi (2014), na Agricultura de Precisão ocorre o uso mais intensivo de máquinas agrícolas com alta tecnologia embarcada. Isso melhora a realização das operações dentro das propriedades agrícolas, pois diminui o erro humano, considera a variabilidade que a área apresenta e, em algumas operações, reduz o tempo de trabalho. Com auxílio dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) e de sensores, as máquinas ajustam automaticamente as doses aplicadas em cada ponto do talhão. Isso garante maior eficiência no uso dos insumos e redução de desperdícios. Além disso, contribui para a sustentabilidade e rentabilidade da produção.

As funções dos nutrientes são complexas no desenvolvimento das plantas, sendo essenciais em todos os seus processos fisiológicos (KIRKBY e RÖMHELD, 2007). Macronutrientes são requeridos em grandes quantidades para o crescimento e desenvolvimento, enquanto micronutrientes, apesar de necessários em pequenas doses, influenciam significativamente diversos processos fisiológicos. A falta desses nutrientes pode prejudicar o desenvolvimento das sementes, afetando sua

ISBN 978-65-990392-6-3

germinação, vigor e uniformidade, o que impacta diretamente na produtividade agrícola (SOUZA, 2022).

O pH é uma característica do solo que assume enorme importância na produção de grãos. No entanto, quando é realizada a operação de calagem a taxa fixa, é comum a observação de pontos com superdosagem ou subdosagem, o que influencia diretamente na disponibilidade ou indisponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas, além de favorecer o aumento da variabilidade dos atributos. Dessa forma, é fundamental buscar alternativas viáveis e sustentáveis para a redução dessa variabilidade, objetivando o cultivo em área homogênea (LIMA et al., 2016).

Os benefícios que a Agricultura de Precisão possibilita através da prática de aplicação a taxa variável é vista como fundamental em um sistema que busca altos tetos produtivos e visa a sustentabilidade no campo. Essa prática possibilita a aplicação assertiva e eficiente de insumos agrícolas, evitando a superdosagem ou subdosagem, além de contribuir na redução da variabilidade espacial dos atributos do solo ao longo do tempo (RICHART et al., 2016).

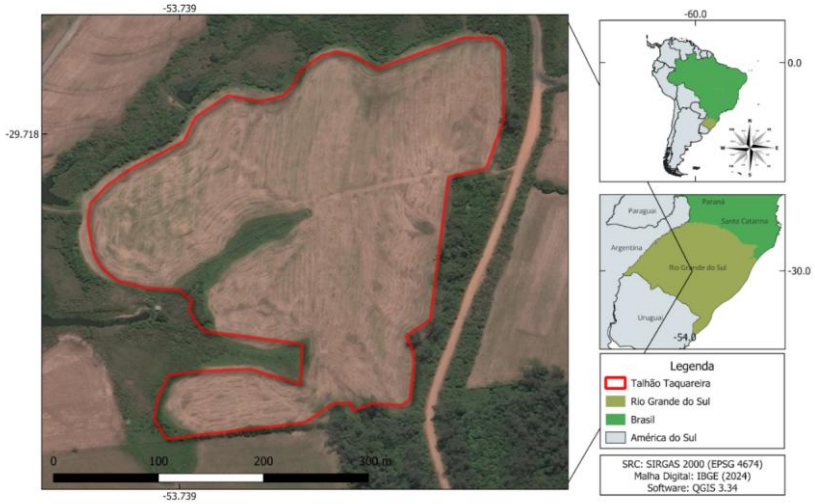
Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a evolução dos teores de pH e matéria orgânica do solo em um talhão agrícola manejado com ferramentas da Agricultura de Precisão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na Área Agropecuária do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). O talhão agrícola avaliado é denominado “Taquareira” (Figura 1), possui área de 11 hectares e está localizado nas coordenadas geográficas centrais latitude 29°43'47" Sul e longitude 53°45'27" Oeste, com altitude média de 107 metros em relação ao nível médio do mar. O solo é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (SANTOS et al., 2018) e o clima da região é do tipo Cfa, subtropical úmido, conforme a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013).

Figura 1 - Talhão agrícola utilizado no estudo



Fonte: Autores (2025)

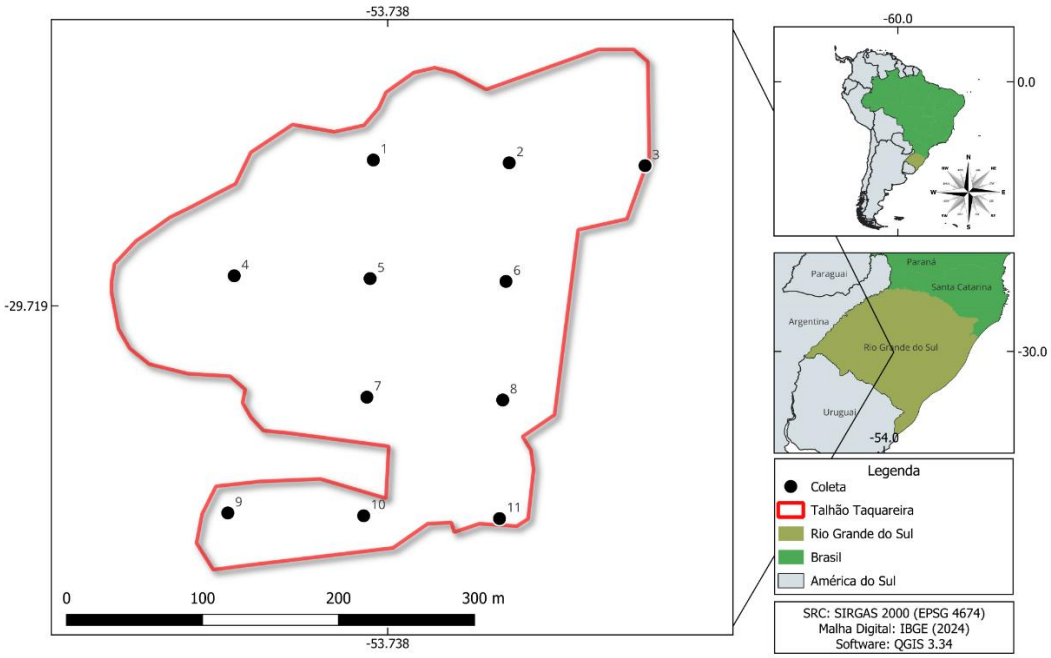
ISBN 978-65-990392-6-3

O início das aplicações de fertilizantes e corretivos em taxa variável no talhão ocorreu no ano de 2012, após a primeira coleta de solo georreferenciada. Ao longo dos anos, o talhão foi cultivado com a rotação entre as culturas de soja e milho no verão, e trigo e mix de plantas de cobertura no inverno.

2.2 COLETA, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Foram avaliados os atributos de fertilidade do solo pH e matéria orgânica. Para o pH, foi utilizado o banco de dados de três anos de amostragem de solo (2012, 2017 e 2020), enquanto para a matéria orgânica, foram utilizados dados de dois anos (2017 e 2020). Em ambas as coletas de solo, utilizou-se um grid amostral de 1 ponto por hectare.

Figura 2- Malha amostral da área de estudo



Fonte: Autores (2025)

As coletas foram realizadas na camada de 0-20 cm de solo. Para a composição de uma amostra, foram coletadas 5 subamostras ao redor do ponto amostral, utilizando uma pá de corte.

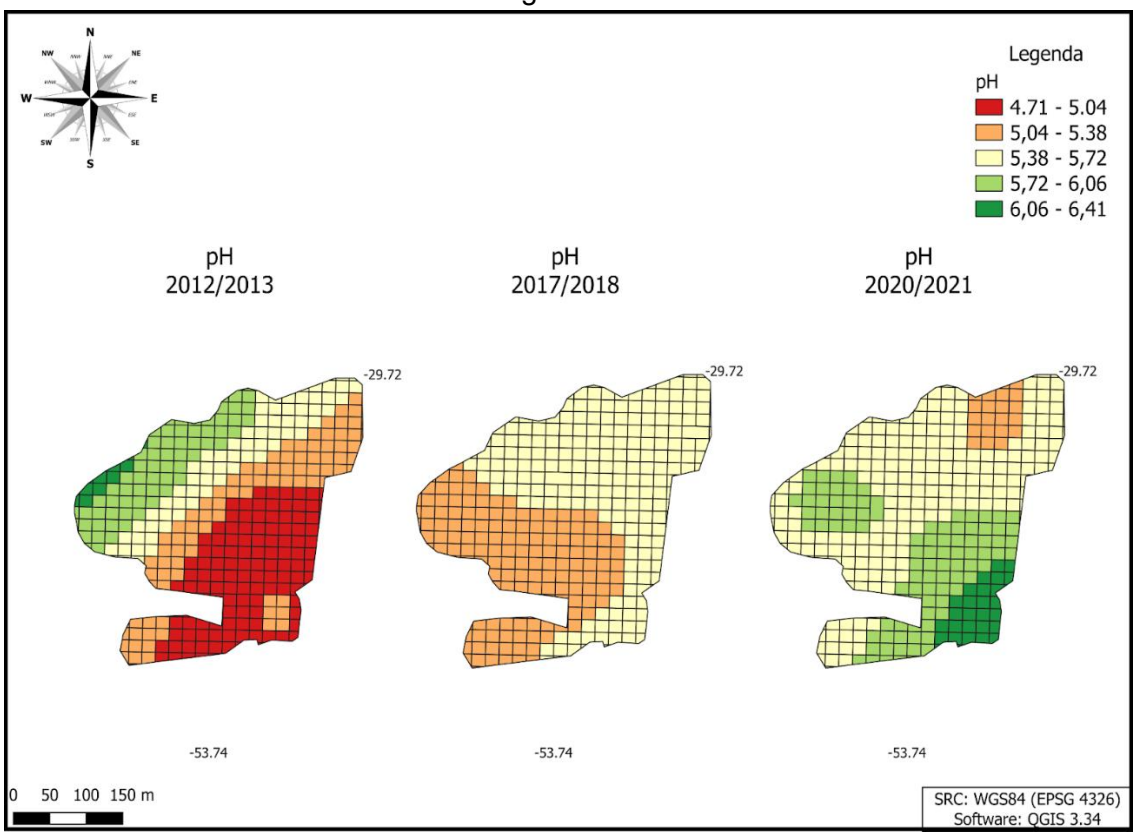
As amostras de solo coletadas foram enviadas para o Laboratório de Análises de Solos da UFSM. Após a tabulação dos dados, foi utilizada uma plataforma agrícola digital para a geração dos mapas temáticos. Nesta etapa, inicialmente os dados da tabela de atributos foram transformados de SIRGAS 2000 para WGS 84 e, a partir disso, foram feitas as interpolações. Para determinar os níveis críticos e ótimos de cada atributo, foi utilizado como referência o Manual de Calagem e Adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina de 2016 (SBCS, 2016).

ISBN 978-65-990392-6-3

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a geração dos mapas georreferenciados de pH nas respectivas safras estudadas (Figura 2), é possível observar a heterogeneidade desse atributo ao longo da área de estudo. No decorrer dos anos agrícolas, observou-se uma melhoria dos níveis de pH do solo no talhão, o que está associado com a forma de correção realizada, que se baseia na necessidade de calcário de cada região. O objetivo das aplicações de calcário foi elevar o pH para níveis acima de 5,5, sendo o valor de referência na tomada de decisão para aplicação de calcário em culturas agrícolas de grãos, segundo o manual.

Figura 3 - Análise da variabilidade espacial do pH do solo em diferentes anos agrícolas.



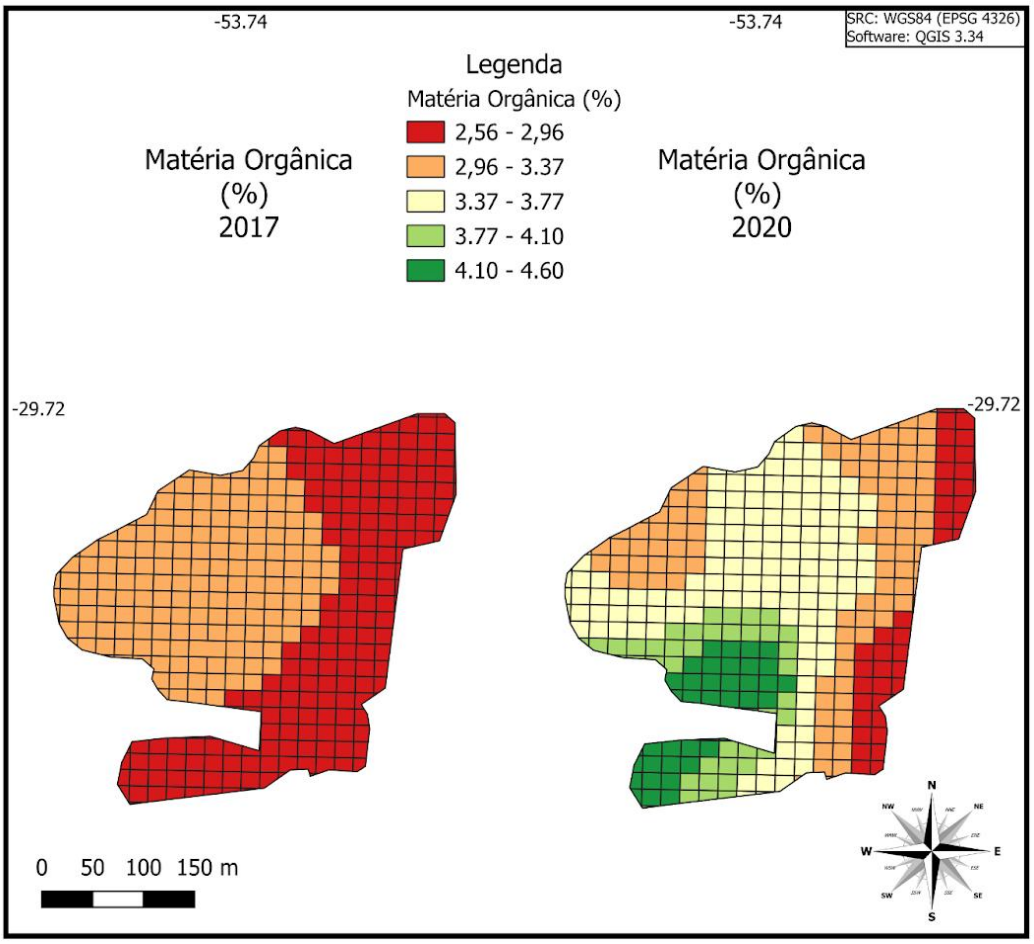
Fonte: Autores (2025).

No ano de 2012, cerca de 70% da área cultivada nesse talhão estava com pH inferior a 5,5. Em 2017, esse valor reduziu para cerca de 60% e, em 2020, apenas 10% do talhão apresentou valor de pH inferior a 5,5. Além da evolução, é necessário dar ênfase na redução de custos e aumento da rentabilidade de uma lavoura, que podem ser alcançados com a adoção adequada dos princípios da Agricultura de Precisão, desde a coleta de informações representativas até a realização dos manejos. O trabalho realizado por Alves et al. (2025) corrobora nesta análise, pois os autores identificaram a redução de custos com aplicação a taxa variável de calcário, em relação a taxa fixa, devido a menor quantidade de calcário aplicada na área. Apesar disso, o custo de máquinas com tecnologia embarcada adequada para

realização destes trabalhos e recursos humanos capacitados, pode resultar em um entrave pelo maior custo inicial.

Com relação aos níveis de matéria orgânica do solo (Figura 3), avaliados nos anos de 2017 e 2020, nota-se que no ano de 2017 cerca de 50% da área do talhão estava com matéria orgânica abaixo de 3%. Já no ano de 2020, foi possível observar um significativo incremento de matéria orgânica no solo, tendo um percentual de apenas 27% da área do talhão com matéria orgânica abaixo de 3%.

Figura 4 - Análise da variabilidade espacial da matéria orgânica do solo em diferentes anos agrícolas.



Fonte: Autores (2025).

Essa evolução nos níveis de matéria orgânica é vista como positiva e representa um reflexo do manejo e técnicas de cultivo que foram empregadas no talhão ao longo dos anos. Entre essas técnicas, destaca-se o sistema plantio direto (SPD), que é fundamental para evitar a desestruturação do solo, tendo em vista que, no sistema de plantio convencional, o revolvimento em profundidade prejudica os atributos físicos do solo (Salomão et al., 2020). O SPD, aliado à rotação de culturas, auxilia na melhoria da qualidade do solo, através do aumento relativo da microbiota, da ação enzimática e do armazenamento de carbono (Barbieri et al., 2019).

Outra prática de manejo adotada no talhão é a semeadura em nível, que, de acordo com o estudo de Paulino et al. (2023) é uma ferramenta eficiente para mitigar ou reduzir a magnitude do escoamento superficial e, consequentemente, a erosão de

ISBN 978-65-990392-6-3

solo, apesar da ocorrência desse processo depender também de outras variáveis, como declividade do terreno e taxa de infiltração de água.

O uso de plantas de cobertura é realizado todos os anos no talhão, devido ao seu potencial de melhoria da qualidade do solo, principalmente pelo aumento na retenção de água, diminuição do impacto das altas temperaturas, redução do aparecimento de plantas espontâneas e redução da incidência de pragas e doenças. Além disso, a palhada possui potencial para aumentar os teores de matéria orgânica, fundamental para a manutenção da atividade da microbiota do solo (Redin et al., 2016).

As variações positivas nos teores de pH e matéria orgânica refletem o impacto do manejo e das práticas conservacionistas associadas à Agricultura de Precisão, destacando a importância da aplicação de insumos em doses variáveis, para atender às necessidades específicas de cada região do talhão e do cuidado para realizar o uso do solo de uma forma adequada, garantindo redução de custo, rentabilidade e sustentabilidade no campo.

4 CONCLUSÃO

O talhão agrícola avaliado apresentou melhoria nos níveis de pH e matéria orgânica ao longo dos anos. O uso de ferramentas da Agricultura de Precisão auxiliou na identificação da necessidade de doses específicas de calcário dentro do talhão, caracterizando-se como uma estratégia fundamental para subsidiar decisões de aplicação localizada de corretivos e fertilizantes, otimizando recursos e aumentando a eficiência produtiva.

Os resultados demonstram que a aplicação em taxa variável contribuiu para reduzir áreas com pH abaixo do nível crítico, refletindo em maior sustentabilidade e resiliência do sistema produtivo. No aspecto ambiental, a combinação de práticas conservacionistas, como plantio direto, rotação de culturas e uso de plantas de cobertura, aliada ao manejo em taxa variável, favoreceu a melhoria da qualidade do solo, contribuindo para o aumento do estoque de carbono, a redução da erosão e o uso mais racional dos insumos agrícolas.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift** 22, 711–728.2013. doi:10.1127/0941-2948/2013/0507.

ALVES, R. W. P.; COSTA, F. da S.; BECKHAUSER, E. C. R.; BATISTA, J. A.; FONSECA, E. L. da. Análise econômica da aplicação de calcário em taxa variável na manutenção da fertilidade do solo para o cultivo de soja. **Caderno Pedagógico**, *[S. l.]*, v. 22, n. 4, p. e14068, 2025. DOI: 10.54033/cadpedv22n4-122. Disponível em: https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/14068. Acesso em: 14 ago. 2025.

BARBIERI, M. et al. Ensaio sobre a bioatividade do solo sob plantio direto em sucessão e rotação de culturas de inverno e verão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 122-134, 2019.

BASSOI, L. H. et al. Agricultura de precisão e agricultura digital. *TECCOGS* – **Revista Digital de Tecnologias Cognitivas**, São Paulo, n. 20, p. 17–36, jul./dez. 2019. DOI: 10.23925/1984-3585.2019i20p17-36. Disponível em: https://revistas.pucsp.br/index.php/teccogs/article/view/44795. Acesso em: 29 jul. 2025.

BERNARDI, Alberto C. de Campos; BETTIOL, Giovana Maranhão; GREGO, Célia Regina; ANDRADE, Ricardo Guimarães; RABELLO, Ladislau Marcelino; INAMASU, Ricardo Yassushi. FERRAMENTAS DE AGRICULTURA DE PRECISÃO COMO AUXÍLIO AO MANEJO DA FERTILIDADE DO SOLO. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 211–227, 2017. DOI: 10.35977/0104-1096.cct2015.v32.23314. Disponível em: https://apct.sede.embrapa.br/cct/article/view/23314. Acesso em: 9 set. 2025.

CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 1329–1339, 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000600018. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbcs/a/tMkDztHK4wSgXFLtZKHZr5P. Acesso em: 18 jul. 2025.

CHERUBIN, M. R. et al. Caracterização e estratégias de manejo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo utilizando a análise dos componentes principais. **Enciclopédia Biosfera**. 2011.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária- **A produção brasileira de grãos** – *salto quantitativo*. Embrapa [Internet]. 3 nov. 2023 [acesso em 28 jul. 2025]. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/84709032/artigo---a-producao-brasileira-de-graos--salto-quantitativo

INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C. Agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C. *et al.* (org.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 21–33.

KIRKBY, E. A.; RÖMHELD, V. Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade. **Informações agronômicas**, v. 118, n. 2, p. 1 24, 2007.

LIMA, G. C. et al. Variabilidade de atributos do solo sob pastagens e mata atlântica na escala de microbacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 18, n. 5, p. 517–526, 2014. DOI: 10.1590/S1415-43662014000500012. Disponível em: http://www.agriambi.com.br/revista/v18n5/v18n5a12.pdf. Acesso em: 18 jul. 2025.

LIMA, C. G. R. et al. Correlação entre componentes da produtividade da cana-de-açúcar com o pH de um Argissolo Vermelho Distrófico do noroeste paulista. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 24, n. 2, p. 120–130, 2016. DOI:

10.13083/reveng.v24i2.592. Disponível em: https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/536. Acesso em: 14 ago. 2025.

MELO, E. B. et al. A importância da agricultura para a sociedade: breve revisão de literatura. **Scientia Generalis**. v. 2, n. Supl. 1, p. 144-144, 2022. Disponível em: https://scientiageneralis.com.br/index.php/SG/article/view/362. Acesso em: 28 jul. 2025.

MONTANARI, et al. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 40(1), p. 69-77. 2005.

PAULINO et al. Perdas de solo por erosão hídrica em diferentes métodos de alinhamento de plantio de *Arachis hypogaea*. **Científica Multidisciplinar**. v. 13, n. 15, p. 1-17, jan./dez. 2024.

REDIN, M. et al. Plantas de cobertura de solo e agricultura sustentável: espécies, matéria seca e ciclagem de carbono e nitrogênio. **Práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água**, p. 7-22, 2016.

RESENDE et al. Agricultura de precisão no Brasil: avanços e impactos no manejo e na conservação do solo, na sustentabilidade e na segurança alimentar. In: LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.; ARAÚJO, A. S. F. de (Ed.). **Agricultura conservacionista no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa, 2014.

RICHART et al. Análise espaço-temporal de atributos químicos do solo influenciados pela aplicação de calcário de cloreto de potássio em taxa variável. **Scientia Agraria Paranaensis**. v. 15, n. 4, p. 391-400, 2016. DOI: 10.18188/sap.v15i4.12260. Disponível em: https://saber.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/view/12260. Acesso em: 14 ago. 2025.

SALOMÃO, P. E. A. et al. A importância do sistema de plantio direto na palha para reestruturação do solo e restauração da matéria orgânica. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 1, p. e154911870-e154911870, 2020.

SANCHEZ, R. B. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**. v. 68(4), p. 1095-103, 2009.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Brasília, Embrapa Solos. 356p. 2018.

SILVA, F. M.; SOUZA, Z. M.; FIGUEIREDO, C. A. P.; VIEIRA, L. H. S.; OLIVEIRA, E. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência Agrotecnologia**. Lavras, v. 32, p. 231-241, 2008.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Núcleo Regional Sul. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de calagem e adubação para os Estados**

do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 11. ed. [s. l.]: CQFS-RS/SC, 2016. 376 p. ISBN 978-85-66301-80-9.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MOREIRA, L. F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1763-1771, 2004.

SOUZA, F. C. A. Manejo nutricional da soja para produção de sementes. In: CRUZ, A. C. G.; SOUZA, J. F.; FERNANDES, A. A. B. (Eds.), **Produção de sementes de soja**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2022.

CAPÍTULO 33

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO A PARTIR DE MAPA DE COLHEITA

Comparison of methods for defining management zones from yield maps

Luís Felipe Rossetto Gerlach[1]; Andre Luis Vian[1]; Christian Bredemeier[1]; Márcio Gabriel Motke Wrubleski[1]; Teresa Enderle[1]; Thauhana Cássia Gasparotto Kuhn[1]; Thiago Santos Cocco[1]

[1] Departamento de Plantas de Lavoura, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Campus do Vale, Av. Bento Gonçalves, 7712, 91540-000, Porto Alegre – RS, Brasil, lfelipeross@hotmail.com; andre.vian@ufrgs.br; bredemeier@ufrgs.br; wrubleskimarcio@gmail.com; terenderle@gmail.com; thauhanakuhn@gmail.com; agro.thiagoscocco@gmail.com

RESUMO

As áreas agrícolas, de modo geral, possuem grande variabilidade. Deste modo, o estudo tem como objetivo comparas três métodos para definição de zonas de manejo (ZM) a partir de um único mapa de colheita de trigo. A produtividade foi interpolada por krigagem e amostrada em malha regular de dez metros, gerando a base para três classificações com três classes de zonas de manejo (baixa, média e alta). O primeiro método baseado no percentual em relação à média produziu áreas moderadamente equilibradas. O segundo método baseado nos tercis, equilibrou o tamanho amostral de cada classe e padronizou a comparação entre zonas. O terceiro baseado no modelo k-means concentrou a classe média, reduziu a zona de baixa e elevou o contraste entre ambientes. Os limites da zona de baixa para média ficaram acima de 3.600 Kg ha^{-1} nos métodos relativos e abaixo de 3.000 Kg ha^{-1} no k-means. A transição média para alta foi próxima nos três métodos, indicando sensibilidade a pequenas variações de safra e de medição. Com isso, a escolha do método deve acompanhar o objetivo do manejo e a etapa do ciclo decisório.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Variabilidade espacial. Geoestatística.

ABSTRACT

Agricultural areas generally present high variability. Thus, this study aimed to compare three methods for defining management zones (MZ) based on a single wheat yield map. Yield was interpolated using kriging and sampled on a regular ten-meter grid, generating the basis for three classifications with three management zone classes (low, medium, and high). The first method, based on the percentage relative to the mean, produced moderately balanced areas. The second method, based on terciles, balanced the sample size of each class and standardized comparisons among zones. The third method, based on the k-means model, concentrated the medium class, reduced the low zone, and increased the contrast between environments. The boundaries between low and medium zones were above 3,600 kg ha^{-1} for the relative methods and below 3,000 kg ha^{-1} for k-means. The transition between medium and high zones was similar across the three methods, indicating sensitivity to small variations in yield and measurement. Therefore, the choice of method should align with the management objectives and the stage of the decision-making cycle.

Keywords: Precision agriculture. Spatial variability. Geostatistics.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

As áreas agrícolas, de modo geral, possuem grande variabilidade, decorrente de diferenças de solo, relevo, água e práticas de manejo, o que se reflete diretamente na produtividade (PIERCE e NOVAK, 1999). Esses padrões espaciais tendem a persistir ao longo do tempo, o que influencia diretamente no risco e no retorno das intervenções. O reconhecimento e o tratamento explícito dessa heterogeneidade são essenciais para que o manejo seja mais eficiente e sustentável (MAESTRINI e BASSO, 2021). Unidades de Gestão Diferenciada, também chamadas de zonas de manejo, surgem como estratégia para transformar essa variabilidade em decisão prática. Ao segmentar o talhão em subáreas relativamente homogêneas, é possível alinhar doses de insumos, práticas de manejo e operações às necessidades locais, aumentando a eficiência econômica e reduzindo impactos ambientais (GAVIOLI et al., 2019; YUAN et al., 2022).

Quanto aos métodos para delineamento das zonas de manejo, normalmente são utilizados dois princípios que se complementam. O primeiro adota classificações cartográficas que impõem cortes diretamente na distribuição dos dados, como o método de divisão por quantis e as separações em relação à média, servindo como linha de base reprodutível e de fácil comunicação para relatórios e diagnósticos iniciais (SHIRATSUCHI et al. 2005; SANTI, 2007). O segundo emprega algoritmos de agrupamento para maximizar a homogeneidade interna em cada zona, com destaque para “k means” e “fuzzy c means”, além de etapas de normalização, seleção de atributos e suavização espacial para eliminar “ilhas” e tornar os mapas implementáveis para aplicações em taxa variável (JAVADI et al., 2022). Estudos comparativos e revisões mostram que diferentes abordagens podem gerar unidades satisfatórias e que a escolha depende do objetivo do manejo, das camadas disponíveis e de critérios de avaliação, como redução da variância intrazona e separação entre grupos.

As zonas de manejo cumprem funções diferentes ao longo do ciclo de decisão e, por isso, a escolha do método deve acompanhar o objetivo do momento. Para diagnóstico rápido e comunicação com a equipe, o uso de produtividade relativa em torno da média facilita a leitura e aplicação, além de ter ampla tradição em materiais técnicos nacionais, o que torna adequada para priorizar correções e orientar amostragens dirigidas em áreas de baixa produtividade persistente (SHIRATSUCHI et al. 2005; SANTI, 2007; LONGO-MINNOLO et al., 2024). Quando a demanda é a comparabilidade entre áreas e padronização de relatórios, os quantis, em especial os tercis, fornecem classes de tamanho semelhante em número de observações, o que facilita auditorias internas e a montagem de faixas experimentais com representatividade balanceada, mantendo reprodutibilidade e clareza para diferentes safras e talhões (SHIRATSUCHI et al. 2005; YUAN et al., 2022). Para maximizar contraste estatístico e ainda gerar mapas base de prescrição a taxa variável, o “k means” tende a separar melhor grupos quando há gradientes claros na produtividade, sobretudo após normalização, seleção de atributos e uma etapa de suavização para garantir contiguidade operacional (GAVIOLI et al., 2019; JAVADI et al., 2022). Em todos os casos, as zonas precisam ser avaliadas com métricas de quantidade e forma de hectares por zona, além de validação agronômica e econômica em mais de uma safra para manter previsibilidade e reduzir risco, aliando variabilidade intratalhão, decisão prática no manejo sítio específico e estabilidade multissafras (PIERCE e NOWAK, 1999; MAESTRINI e BASSO, 2021; YUAN et al., 2022).

ISBN 978-65-990392-6-3

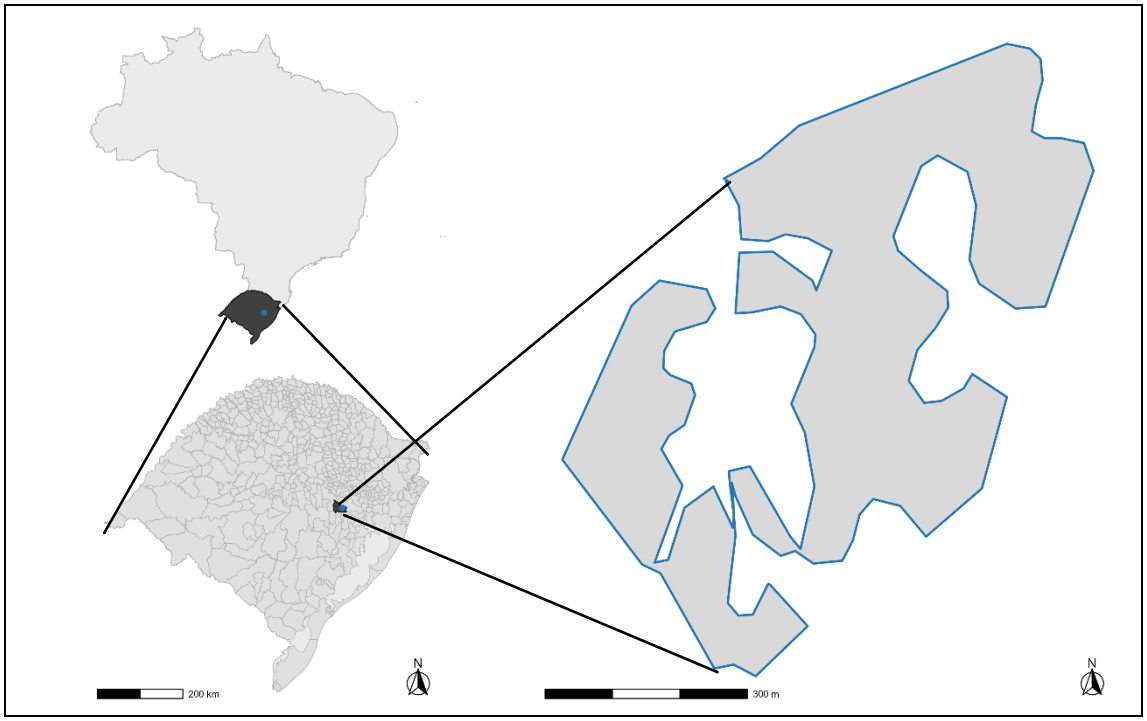
Diante desse contexto, se faz necessário avaliar diferentes abordagens para transformar um único mapa de colheita em zonas de manejo operacionais e comparáveis. Assim, o presente estudo buscou oferecer um procedimento simples e replicável que una clareza de comunicação e qualidade estatística, reconhecendo a limitação de trabalhar com uma única safra e indicando a incorporação futura de séries multissafras para testar a estabilidade temporal. Com isso, o objetivo do estudo foi comparar zonas de manejo confeccionadas por três diferentes métodos de definição, a partir de um único mapa de colheita.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em um talhão no município de General Câmara (Figura 1), Rio Grande do Sul. O clima regional enquadra-se como Cfb na classificação de Köppen (KUINCHTNER e BURIOL, 2001), com regime subtropical úmido, verões amenos e ausência de estação seca, conforme mapeamentos climáticos para o Sul do Brasil (ALVARES et al., 2013). O solo predominante é classificado como Luvissolo, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, com horizonte B textural, maior saturação por bases e tendência à fertilidade natural de moderada a alta, profundidade variável e drenagem de moderada a boa, características que influenciam a disponibilidade hídrica no perfil, a estrutura e a resposta produtiva no talhão (SANTOS et al., 2013). O relevo é suavemente ondulado, favorecendo o uso agrícola mecanizado e condicionando a redistribuição lateral de água, o que ajuda a explicar padrões espaciais de produtividade observados em campo.

Figura 1 – Localização da área de estudo.



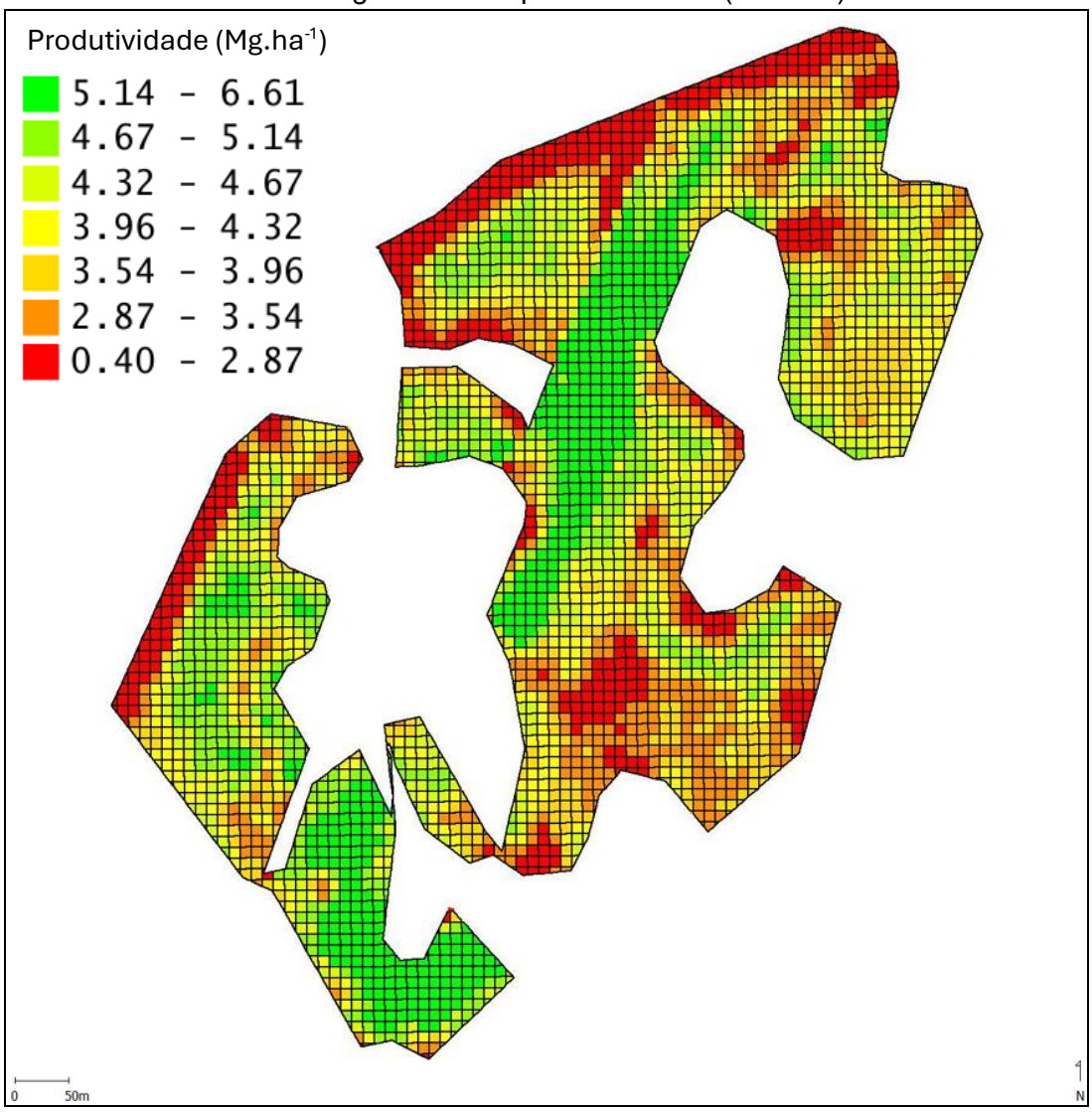
Fonte: autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

2.2 Coleta, processamento e análise de dados

Os dados de produtividade de trigo da safra 2023 foram exportados do monitor de colheita e carregados no software QGIS, adotando o contorno do talhão como limite de análise e garantindo compatibilidade de referência espacial entre camadas. A superfície contínua de produtividade foi gerada por krigagem com base em modelagem de semivariograma, procedimento consagrado em geoestatística aplicada a recursos naturais e amplamente empregado em agricultura de precisão (GREGO et al., 2014). Após, foi realizado amostragem da superfície em uma malha regular de células de dez por dez metros (10x10m) (Figura 2). Essa grade serviu como base cartográfica para os métodos de classificação e agrupamento utilizados nas etapas seguintes. A opção por krigagem e por uma grade regular visa conciliar rigor estatístico de estimativa espacial com representatividade operacional em escala de manejo.

Figura 2 – Produtividade de grãos de trigo com amostragem da superfície em uma malha regular de dez por dez metros (10x10m).



Fonte: autores (2025).

Posteriormente, foi realizado a definição das zonas de manejo por três diferentes métodos, sendo um com base na produtividade relativa à média, o segundo com base nos quantis (tercis) e o último a partir de método estatístico K-means univariado sobre produtividade. O primeiro método calcula a produtividade relativa de cada célula em relação à média do talhão e classifica em três faixas adotadas neste estudo, ou seja, menor que 90%, entre 90% e 110% e maior que 110% da média (SHIRATSUCHI et al. 2005; SANTI, 2007).

O segundo método consiste em classificar por tercis. Parte-se do vetor de produtividade já limpo e ordena-se a distribuição empírica para identificar dois pontos de corte que dividem o conjunto em três partes com o mesmo número de observações. O primeiro corte corresponde ao tercil inferior que separa a faixa de menor produtividade, o segundo corte corresponde ao tercil superior que separa a faixa de maior produtividade e a faixa intermediária fica entre esses dois limiares (LONGO-MINNOLO et al., 2024). Os tercis criam classes balanceadas em tamanho amostral, o que facilita comparações entre áreas e safras e padroniza relatórios e faixas experimentais. No terceiro método, a metodologia de k-means foi implementada para agrupar as células do mapa de colheita em “K” classes de produtividade internamente homogêneas e ordenadas do menor para o maior valor. Assim, o algoritmo procura K centroides que minimizam a soma dos quadrados intragrupo por alternância entre etapas de atribuição e atualização dos centroides (ROUSSEEUW, 1987; JAVADI et al., 2022).

Todas as análises e a aplicação dos modelos de definição de zonas de manejo foram realizadas no software R. A preparação dos dados, o recorte pelo contorno do talhão e as classificações por produtividade relativa, tercis e k means seguiram o mesmo fluxo computacional, enquanto a etapa cartográfica incluiu leitura das camadas, dissolução por classe e exportação de arquivos vetoriais e figuras. Os mapas finais de ambientes foram apresentados com três classes, sendo zona de baixa (vermelho), zona de média (amarelo) e zona de alta (verde), mantendo ordenação cromática coerente com a hierarquia de produtividade e favorecendo interpretação rápida e didática em campo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 resume de forma comparável os três métodos de definição de unidades baixa, média e alta, a partir do mesmo conjunto de células e da mesma área total. O número total de observações permanece constante entre métodos, com 3.251 células, e a soma das áreas também se mantém estável, com 28,79 hectares, o que garante que as diferenças observadas adiante se devem ao critério de classificação e não a mudanças de base amostral ou de área.

O k-means concentrou a classe baixa em menor área e ampliou a classe média, mantendo a classe alta em patamar similar aos demais métodos. As áreas foram de cerca de 4,10 ha para a classe baixa, 13,89 ha para a média e 10,80 ha para a alta, com médias aproximadas de 2.119 Kg ha^{-1}, 3.827 Kg ha^{-1} e 5.120 Kg ha^{-1}, respectivamente. Este comportamento indica aumento de contraste entre ambientes extremos e uma classe intermediária mais representativa do talhão, desenho que tende a facilitar decisões de manejo ao focalizar intervenções de correção em menos hectares e reservar a maior parcela para ajustes finos.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 1 – Análise descritiva dos diferentes métodos de definição de zonas de manejo.

	Classe	n	Área (ha)	Média (Kg ha⁻¹)	Mínimo (Kg ha⁻¹)	Máximo (Kg ha⁻¹)
Relação à média	Baixa	1026	8,63	2.732	0.401	3.624
	Média	984	8,87	4.037	3.626	4.431
	Alta	1241	11,29	5.092	4.432	6.607
Tercis	Baixa	1084	9,15	2.781	0.401	3.667
	Média	1084	9,82	4.124	3.670	4.551
	Alta	1083	9,82	5.180	4.553	6.607
K-means	Baixa	518	4,10	2.119	0.401	2.973
	Média	1544	13,89	3.827	2.983	4.470
	Alta	1189	10,80	5.120	4.473	6.607

Legenda: n= número de observações.
Fonte: autores (2025)

Nos métodos por percentual da média e por tercis, o limite entre as classes baixa e média ficou acima de 3.600 Kg ha⁻¹ o que indica uma transição em patamar relativamente elevado do rendimento. No primeiro caso, o corte apareceu em 3.624 – 3.626 Kg ha⁻¹ e nos tercis em 3.667 – 3.670 Kg ha⁻¹, ambos sustentando uma passagem suave e com pouco espaço vazio entre as classes. Já no k-means o limite desloca-se para baixo de 3.000 Kg ha⁻¹ com 2.973 – 2.983 Kg ha⁻¹, o que torna a classe baixa mais restritiva e concentra nessa categoria áreas de desempenho claramente inferior. Essa diferença de patamar ajuda a entender por que o k-means aumenta o contraste entre ambientes e os outros dois métodos preservam maior continuidade entre baixa e média regiões. Já o limite entre as classes de média para alta foi próximo para os três métodos, com cortes em 4.431 – 4.432 Kg ha⁻¹ no percentual em relação à média, 4.551 – 4.553 Kg ha⁻¹ nos tercis e 4.470 – 4.473 Kg ha⁻¹ no k-means, o que indica limites similares e, portanto, sensíveis a pequenas variações de safra ou de medição.

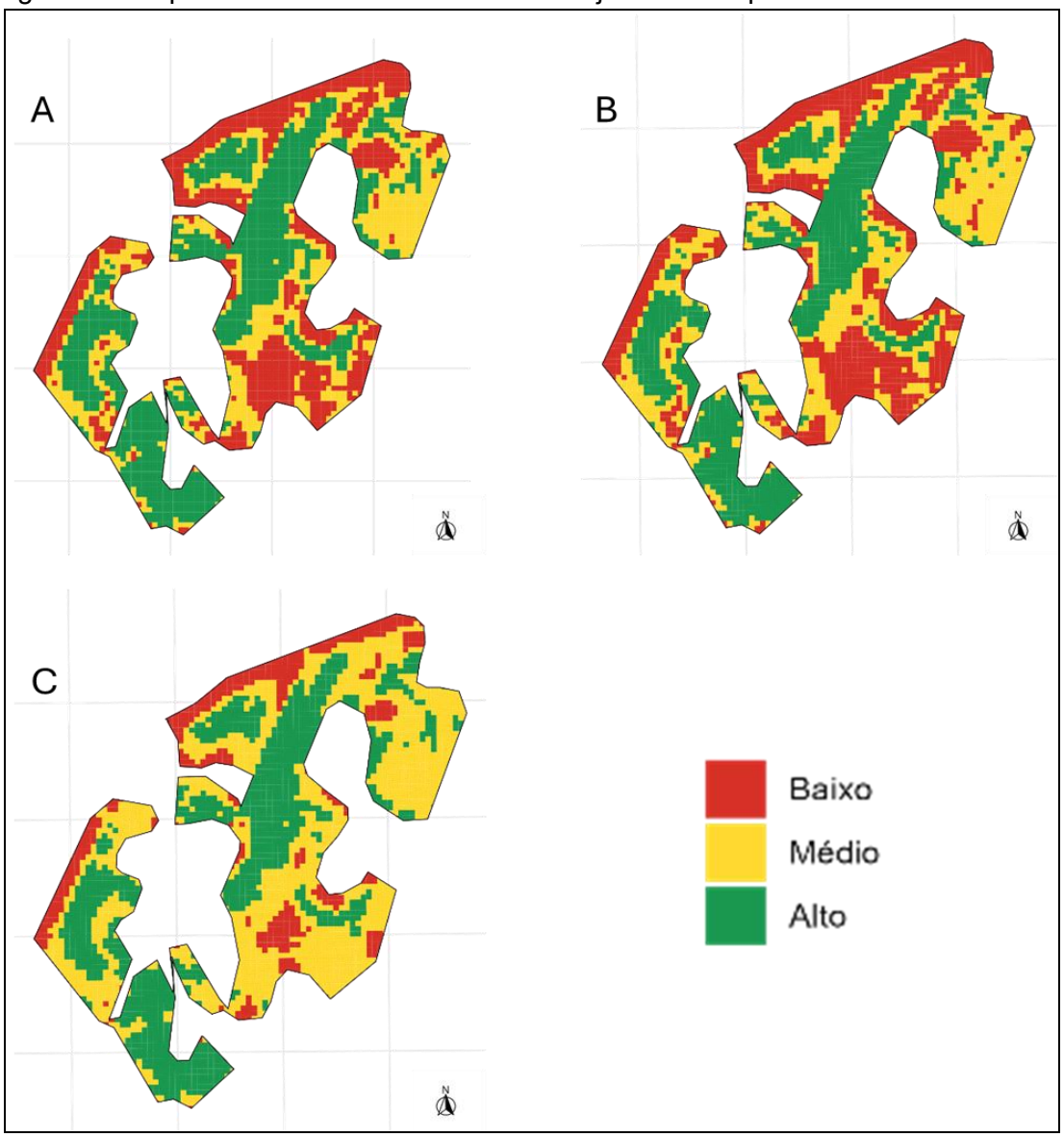
Na Figura 3, o método relativo ao percentual da média (Figura 3 A) revela um gradiente intuitivo em que o verde (zona de alta) ocupa a maior parte do talhão, o amarelo (zona de média) surge como faixa de transição e o vermelho (zona de baixa) aparece em manchas menores e periféricas, gerando leitura rápida porque os limites seguem a referência média do próprio talhão. No método por quantis (Figura 3 B), as três classes ficam mais equilibradas em área, o que desloca um pouco as bordas para que cada ambiente tenha tamanho parecido, com isso a zona de manejo de baixa produtividade avança sobre trechos que eram da zona de média no A e a zona de alta se retrai em margens, preservando o desenho geral mas padronizando a comparação entre mapas. No método de definição por k-means (Figura 3 C), a zona de média torna-se dominante, a zona de baixa fica mais restrita aos locais próximos ao limite do talhão e a zona de alta se comporta de forma parecida com os demais métodos. Em termos práticos, a definição de zonas de manejo por percentual em relação à média (A) favorece diagnóstico e comunicação imediata, a definição de zonas de manejo por quantis (B) entrega comparabilidade por balancear o tamanho das classes e a definição de zonas de manejo pelo método K-means (C) prioriza decisões

ISBN 978-65-990392-6-3

operacionais ao focalizar correções em menos ha de baixa e reservar grande parte da área para ajustes finos.

Os padrões observados são coerentes com o que a literatura descreve para três famílias de métodos de zoneamento. Abordagens relativas, como cortes em torno da média e quantis, tendem a preservar o gradiente original e oferecem classes reprodutíveis e facilmente comunicáveis, sendo úteis para padronizar relatórios e comparações entre safras. Em aplicações recentes, a divisão por quantis tem sido adotada como linha de base para construir zonas operacionais a partir de variáveis de rendimento e sensoriamento remoto, exatamente por equilibrar o tamanho amostral das classes e manter a hierarquia do atributo mapeado (LONGO-MINNOLO et al., 2024; MAESTRINI e BASSO, 2021).

Figura 3 – Mapas temáticos das zonas de manejo definidas pelos diferentes modelos.



Legenda: A= Zonas de manejo definidas por percentual em relação à média; B= Zonas de manejo definidas por quantis; C= Zonas de manejo definidas pelo método K-means.
Fonte: autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

Já os agrupamentos buscam maximizar a homogeneidade interna e a separação entre grupos. Por isso, métodos como o k-means costumam aumentar o contraste entre ambientes, comprimindo “bordas” e isolando focos de baixo desempenho. Em termos quantitativos, isso se reflete em maior redução da variância intrazona e em índices de qualidade de cluster mais favoráveis quando os dados são devidamente preparados. Estudos de avaliação e síntese recomendam medir a qualidade com o Variance Reduction Index (VRI) ou com índices de Silhouette, formalizando a expectativa de que a soma das variâncias dentro das zonas seja menor que a variância total (GAVIOLI et al., 2019; ROUSSEEUW, 1987). Nesse quadro, o k-means frequentemente mostra bom desempenho, desde que precedido por normalização e seleção de atributos, e sucedido por uma etapa de suavização espacial para remover “ilhas” e melhorar a implementação da taxa variável (JAVADI et al., 2022).

Comparativos amplos reforçam que não há um único algoritmo superior em todos os contextos. Em uma avaliação com 20 algoritmos aplicada a campos comerciais no Brasil, múltiplas técnicas produzindo duas ou três classes alcançaram reduções de variância satisfatórias e alta homogeneidade interna, com destaque pontual para métodos que geraram zonas pouco fragmentadas. O k-means figurou entre os bem-sucedidos, mas não foi o único, o que destaca a importância de alinhar a escolha ao objetivo agronômico e ao desenho final das zonas (GAVIOLI et al., 2019).

Do ponto de vista temporal, a interpretação de zonas derivadas de uma única safra deve considerar a assimetria típica das distribuições de produtividade e sua relação com estabilidade. A incerteza de classificação diminui conforme aumenta o número de anos incorporados, apoiando a prática de validar zonas com séries multissafras e métricas objetivas de separação (MAESTRINI e BASSO, 2021).

De modo geral, métodos relativos preservam comparabilidade e comunicação, mas podem suavizar contrastes quando a distribuição é assimétrica. Agrupamentos como o k-means elevam a separação estatística e tendem a produzir zonas extremas mais destacadas, sobretudo quando integrados a fluxos de normalização, seleção de atributos e suavização.

4 CONCLUSÃO

Cada método atende a um propósito distinto. Percentual da média favorece diagnóstico rápido e comunicação com a equipe. Tercis oferecem comparabilidade entre áreas e safras ao balancear o tamanho das classes. K-means aumenta a separação estatística e prioriza intervenções ao isolar com maior nitidez os ambientes de menor desempenho e ampliar a classe intermediária aplicável a ajustes finos.

Em termos operacionais, recomenda-se adotar dissolução por classe e tamanho mínimo de mancha para viabilizar a aplicação em taxa variável, bem como validar o desenho com séries multissafras antes de decisões estruturais. A incorporação futura de camadas auxiliares e testes de sensibilidade em k-means e na resolução da malha tende a aumentar a robustez das zonas propostas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi desenvolvido com apoio da CAPES, através da concessão de bolsa de doutorado.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift,** v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

GAVIOLI, A.; SOUZA, E. G. de; BAZZI, C. L.; SCHENATTO, K.; BETZEK, N. M. Identification of management zones in precision agriculture: an evaluation of alternative cluster analysis methods. **Biosystems Engineering**, v. 181, p. 86–102, 2019. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.02.019.

GILI, A.; ÁLVAREZ, C.; BAGNATO, R.; NOELLEMEYER, E. Comparison of three methods for delineating management zones for site-specific crop management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 139, p. 213–223, 2017. DOI: 10.1016/j.compag.2017.05.022.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. de; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Org.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014.

JAVADI, S. H.; GUERRERO, A. P.; MOUAZEN, A. M. Clustering and smoothing pipeline for management zone delineation using proximal and remote sensing. **Sensors**, v. 22, n. 2, 645, 2022. DOI: 10.3390/s22020645.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. Clima do estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 171–182, 2001.

LONGO-MINNOLO, G.; CONSOLI, S.; VANELLA, D.; PAPPALARDO, S.; GUARRERA, S.; MANETTO, G.; CERRUTO, E. Delineating citrus management zones using spatial interpolation and UAV-based multispectral approaches. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 222, e109098, 2024. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109098.

MAESTRINI, B.; BASSO, B. Subfield crop yields and temporal stability in thousands of US Midwest fields. **Precision Agriculture**, v. 22, p. 1749–1767, 2021. DOI: 10.1007/s11119-021-09810-1.

PIERCE, F. J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, v. 67, p. 1–85, 1999. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)60513-1.

ROUSSEEUW, P. J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 20, p. 53–65, 1987. DOI: 10.1016/0377-0427(87)90125-7.

SANTI, A. L. **Relações entre indicadores de qualidade do solo e a produtividade das culturas em áreas com agricultura de precisão**. 2007. 175 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) — Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Santa Maria, RS, 2007.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

SHIRATSUCHI, L. S.; QUEIRÓS, L. R.; FACCIONI, G. C. **Classificação não-supervisionada no delineamento de zonas de manejo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 150). ISSN 1676-918X.

YUAN, Y.; SHI, B.; YOST, R.; LIU, X.; TIAN, Y.; ZHU, Y.; CAO, W.; CAO, Q. Optimization of management zone delineation for precision crop management in an intensive farming system. **Plants**, v. 11, n. 19, e2611, 2022. DOI: 10.3390/plants11192611.

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque (RS) · cotrijal · UFSM

CAPÍTULO 34

EFEITOS DE INOCULAÇÕES E IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR NO CULTIVO DO MILHO SAFRINHA

Effects of inoculation and supplementary irrigation on second-cropped corn cultivation

Taís Gonçalves Pinto[1]; Érika Batista Feron[1]; João Gabriel Fortes Peixoto[1]; Raissa Wolffenbuttel[1]; Richard Massirer Prochnow[1]; Marcus Vinícius Tres[2]; Giovani Zabot[3]; Alberto Eduardo Knies[4]

[1] Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs), Rua Sete de Setembro, nº. 1040, Centro, CEP 96508-010, Cachoeira do Sul - RS, Brasil, e-mail para contato <tais-pinto@uergs.edu.br>.
[2] Eng. de Alimentos, Me. e Dr. em Engenharia de Alimentos. Professor Adjunto da Universidade Federal de Santa Maria Campus Cachoeira do Sul - RS, Brasil <marcus.tres@ufsm.br>.
[3] Eng. de Alimentos e Dr. em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Maria Campus Cachoeira do Sul - RS, Brasil <giovani.zabot@ufsm.br>.
[4] Eng. Agr., Me. em Ciência do Solo e Dr. em Eng. Agrícola, prof. Adjunto da Uergs Unidade em Cachoeira do Sul - RS, <alberto-knies@uergs.edu.br>.

RESUMO

A cultura do milho é um dos principais cultivos agrícolas do mundo, fortemente influenciada pela disponibilidade hídrica e pelo manejo nutricional. Este trabalho avaliou os efeitos das inoculações com *Azospirillum brasilense* e *Methylobacterium symbioticum*, isoladas e em combinação, sob diferentes regimes hídricos (sequeiro e irrigado) na cultura do milho. O experimento foi conduzido na Estação Agronômica da Uergs, em Cachoeira do Sul – RS, utilizando delineamento em blocos ao acaso em esquema bifatorial. Foram analisadas as variáveis de altura das plantas, número de grãos por espiga, massa de mil grãos e produtividade. Os resultados mostraram que a irrigação reduziu os efeitos do estresse hídrico, promovendo maior rendimento, mas a inoculação também proporcionou ganhos significativos mesmo em sequeiro. Não houve diferença estatística entre os inoculantes, porém todos superaram a testemunha. Conclui-se que a integração entre irrigação e bioinsumos é alternativa sustentável para aumentar a produtividade e sustentabilidade do cultivo do milho.
Palavras-chave: Bioinsumos. Tratamento de sementes. Regime hídrico.

ABSTRACT

Corn is one of the world's most important agricultural crops, strongly influenced by water availability and nutritional management. This study evaluated the effects of inoculations with *Azospirillum brasilense* and *Methylobacterium symbioticum*, alone and in combination, under different water regimes (rainfed and irrigated) on corn. The experiment was conducted at the Uergs Agronomic Station in Cachoeira do Sul, RS, using a randomized block design in a two-factor scheme. Variables such as plant height, number of grains per ear, thousand-grain weight, and productivity were analyzed. The results showed that irrigation reduced the effects of water stress, promoting higher yields, but inoculation also provided significant gains even under rainfed conditions. There was no statistical difference between the inoculants, but all outperformed the control. The conclusion is that the integration of irrigation and bioinputs is a sustainable alternative for increasing the productivity and sustainability of corn cultivation.
Keywords: Bioinputs. Seed treatment. Water regime.

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma das commodities agrícolas mais importantes no mundo, sendo a principal fonte energética para ração animal, bem como base alimentar em diversos países e, não menos importante, utilizado na produção de combustível renovável (CONAB, 2019), representando, portanto, um dos principais cereais cultivados em todo o mundo, e no Brasil situa-se dentre os cereais mais comercializados (MÁXIMO et al., 2019).

A produtividade do milho é fortemente condicionada por fatores ambientais, como o clima durante o ciclo da cultura, a disponibilidade hídrica e as características do solo. Dentre esses elementos, o teor de umidade no solo se destaca como determinante para a obtenção de elevados rendimentos.

Nesse sentido, a irrigação desempenha papel fundamental ao assegurar o equilíbrio hídrico em níveis adequados, contribuindo para a estabilidade da produção e reduzindo as oscilações de safra. As oscilações nas safras de milho nas principais regiões produtoras do Brasil estão associadas à disponibilidade de água, sobretudo no período crítico da cultura, que vai do pendoamento ao início do enchimento de grãos (MATZENAUER, 1994; BERGONCI et al., 2001; BERGAMASCHI et al., 2004).

Reduções nas colheitas são frequentes e intensas, principalmente no Rio Grande do Sul, apesar da tendência clara de aumento dos rendimentos agrícolas, decorrente de avanços tecnológicos em insumos, melhoramento genético e manejo da cultura, além da redução dos riscos climáticos proporcionada pelo zoneamento agrícola (MATZENAUER et al., 2002; BERGAMASCHI et al., 2004).

Diante desse cenário de instabilidade produtiva, torna-se indispensável discutir alternativas que aliem produtividade agrícola à sustentabilidade ambiental. A busca pela produção de alimentos sem comprometer drasticamente a saúde do solo, a biodiversidade, o uso da água e o abastecimento de alimentos é incansável (WANG, 2022; AHMAD et al., 2022). Vários fatores estão diretamente relacionados a essa baixa produtividade, dentre os quais podemos citar a densidade populacional, plantio fora do período adequado, uso de cultivares com baixa aptidão genética e não adaptadas, manejo inadequado de pragas e doenças e, carências nutricionais (BAUM et al., 2020; REVILLA et al., 2021; DJAMAN et al., 2022).

Para alcançar elevada produtividade na cultura do milho, é indispensável uma adubação adequada, sobretudo em relação ao nitrogênio. No entanto, a adubação nitrogenada química, comumente realizada com ureia, representa um dos maiores custos de produção, além de gerar impactos ambientais significativos. Diante disso, pode ser reduzido a dependência da adubação nitrogenada, por meio de experimentos com diferentes inoculações bacterianas, utilizando *Azospirillum brasilense* e *Methylobacterium symbioticum*.

O *Azospirillum brasilense* já vinha sendo estudado em pesquisas anteriores, porém, quando associado a doses elevadas de adubação nitrogenada, os efeitos positivos não foram expressivos. Assim, optou-se por combiná-lo com o *Methylobacterium symbioticum*, uma bactéria relativamente mais recente em estudos. Na filosfera, apenas cerca de 30% das espécies de *Methylobacterium* conseguem fixar nitrogênio atmosférico (MADHAIYAN et al., 2015). No entanto, esse nitrogênio atmosférico representa uma grande vantagem para o estabelecimento dessas espécies na filosfera, visto que o nitrogênio costuma ser o nutriente mais limitante para o crescimento das plantas (CONLEY et al., 2009). O nitrogênio atmosférico não está

disponível para o metabolismo das plantas (DOURADO et al., 2015), e bactérias fixadoras de nitrogênio reduzem o N_2 atmosférico a amônio (NH_4^+) por meio da enzima nitrogenase visando potencializar os resultados e explorar novas possibilidades de manejo.

O uso de fertilizantes foliares, tem se consolidado como uma técnica eficiente para aumentar o porte e a produtividade de diversas culturas, ao fornecer uma suplementação adequada de nutrientes através das folhas (KAPPES et al., 2013). É uma prática que se destaca atualmente na agricultura não apenas por corrigir rapidamente deficiências nutricionais, mas também por distribuir os nutrientes de forma eficiente e sustentável, contribuindo para o manejo mais responsável dos recursos agrícolas (ESPADA, 2021).

Considerando o contexto apresentado, o presente estudo tem como objetivo avaliar os efeitos comparativos das inoculações com *Azospirillum brasilense* e *Methylobacterium symbioticum* sob diferentes regimes hídricos na cultura do milho. Busca-se compreender como a interação entre microrganismos promotores de crescimento vegetal e a disponibilidade de água influencia variáveis de desenvolvimento, como altura de plantas e inserção da primeira espiga, bem como os componentes de rendimento, incluindo número de grãos por espiga, massa de mil grãos e produtividade final. Dessa forma, pretende-se verificar se a utilização de bioinsumos pode minimizar os efeitos do déficit hídrico, contribuindo para maior estabilidade produtiva e oferecendo uma alternativa sustentável ao uso exclusivo de fertilizantes químicos nitrogenados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento a campo foi conduzido no município de Cachoeira do Sul, no Estado do Rio Grande do Sul, na área experimental da Estação Agronômica da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs), situada em latitude 29º53’11,5” S, longitude 53º00’44.2” W e altitude de 125 m. O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico, de acordo com a classificação da EMBRAPA (2018), apresentando textura média e boas condições para o cultivo de milho. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo subtropical úmido, caracterizado por chuvas bem distribuídas ao longo do ano e verões quentes, condições que favorecem o desenvolvimento da cultura.

O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, em esquema bifatorial, com parcelas subdivididas e três repetições. O fator A correspondeu aos tratamentos com bactérias promotoras de crescimento vegetal: (a) testemunha, (b) *Azospirillum brasilense*, (c) *Methylobacterium symbioticum* e (d) a combinação de *Azospirillum brasilense* + *Methylobacterium symbioticum*. O fator B foi composto pelos regimes hídricos: sequeiro e irrigado.

As parcelas experimentais foram constituídas por cinco linhas de cultivo, cada uma com 2,5 m de largura e 4 m de comprimento, totalizando área útil representativa da lavoura. A semeadura foi realizada no sistema de plantio direto, sobre palhada de cobertura formada por aveia-preta, centeio, nabo forrageiro e ervilhaca, contribuindo para a melhoria da estrutura do solo e conservação da umidade. Utilizou-se uma semeadora-adubadora tracionada por trator, regulada para o espaçamento de 0,5 m entre linhas, garantindo a uniformidade da distribuição das sementes (figura 1a e 1b).

ISBN 978-65-990392-6-3

A semeadura ocorreu em 27 de janeiro de 2025, empregando-se o híbrido P3565 PWU, de ciclo precoce, com densidade de 65.000 sementes ha^{-1}, visando um estande final de 60.000 plantas ha^{-1}. A inoculação com *Azospirillum brasilense e Methylobacterium symbioticum* foi realizada via aplicação foliar no estádio V4, quando as plantas apresentavam área foliar suficiente para absorção do produto. Para o *Azospirillum brasilense*, utilizou-se o produto comercial Azoto (Inocular Soluções Agrícolas), na dose de 5 mL kg^{-1}. Já para *Methylobacterium symbioticum*, empregou-se o produto comercial Utrisha™ N (Corteva Agriscience), na dose de 0,1 kg por parcela.

Figura 1 - Etapas do experimento a campo com milho sob diferentes tratamentos de inoculação e regimes hídricos.



Legenda: a) Abastecimento da semeadora; b) Operação de semeadura do experimento; c) Desenvolvimento das plantas.
Fonte: Autores (2025).

Os tratos culturais, como controle de plantas daninhas, pragas e doenças, foram realizados de acordo com as recomendações técnicas para a cultura do milho (EICHOLZ et al., 2020), de forma a não interferir nos efeitos dos tratamentos avaliados.

As avaliações agronômicas foram realizadas em 3 plantas por parcela, onde se mediram a altura das plantas (distância do solo até a inserção da última folha da haste principal), número total de grãos por espiga, massa de mil grãos e produtividade de grãos. Esses parâmetros permitiram uma análise detalhada do crescimento, do desenvolvimento e do potencial produtivo das plantas em função dos tratamentos de inoculação e regimes hídricos.

Os dados coletados foram analisados com auxílio do software Sisvar, sendo submetidos à análise de variância e, os efeitos estatisticamente significativos pelo teste F foram discriminados pelo teste de Tukey para a comparação de médias com 5% de probabilidade de erro.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A evapotranspiração da cultura foi estimada em 365 mm e, as chuvas somaram 819,00 mm ao longo do ciclo e, apesar da grande lâmina de chuvas tiveram períodos

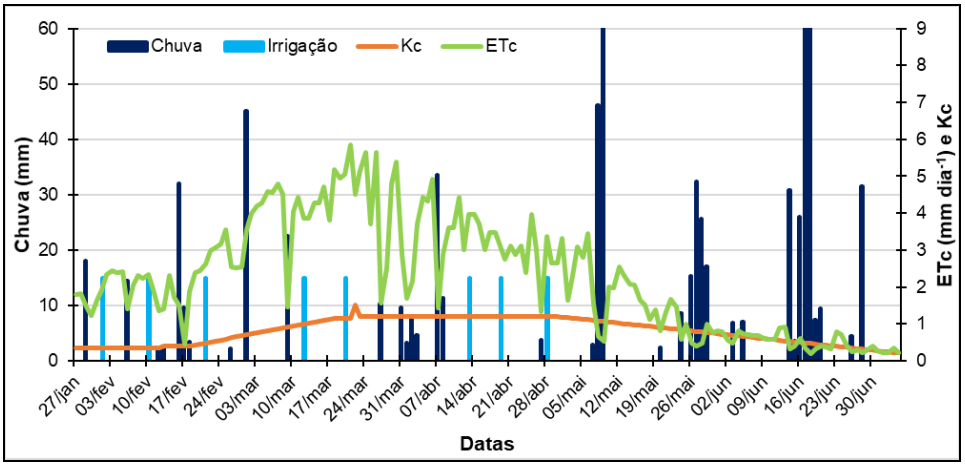
ISBN 978-65-990392-6-3

em que estas foram insuficientes para manter o armazenamento de água no solo em níveis adequados, sendo necessário a irrigação suplementar total de 120,00 mm em 8 irrigações, na metade inicial do ciclo da cultura (figura 2).

A safra foi marcada pela ocorrência do fenômeno La Ninã, especialmente entre o final de dezembro de 2024 até fevereiro de 2025. De acordo com o Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA, 2025), em dados analisados do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), se vivenciou dois meses anômalos de La Niña, dezembro de 2024 e janeiro de 2025, onde houve uma tendência de Neutralidade, porém com um viés frio das águas do pacífico.

O fenômeno La Niña, embora com menor intensidade, impactou o verão 2024/25 no Rio Grande do Sul, com chuvas irregulares e tempo seco predominando entre períodos de instabilidade. A Região Sul teve um verão com chuva espaçada e dias secos alternados com episódios de instabilidade (INMET, 2025).

Figura 2. Balanço hídrico do experimento com a cultura do milho.



Fonte: Autores (2025).

Na tabela 1 são apresentados os resultados dos indicadores estatísticos do experimento. Conforme pode-se observar, não houve efeito de interação entre os fatores inoculação das sementes e regimes hídricos. O fator inoculação das sementes afetou significativamente as variáveis altura das plantas, MMG e produtividade de grãos, enquanto que, o fator regime hídrico apresentou efeito significativo na altura das plantas, número de grãos por espiga e produtividade de grãos.

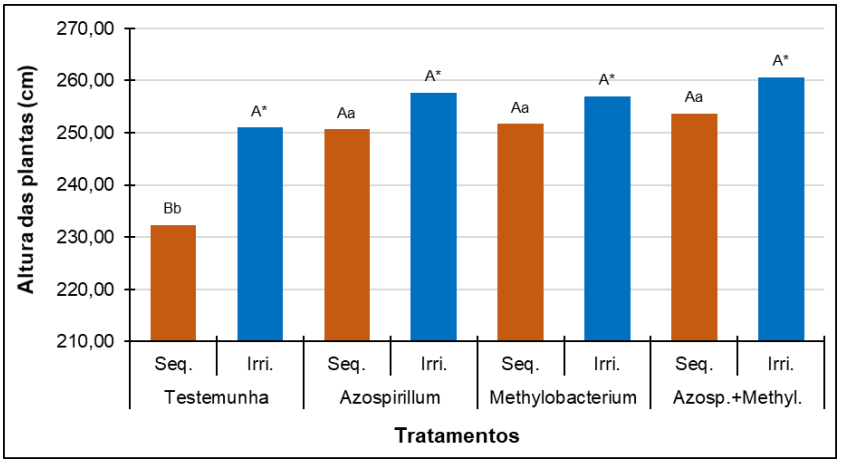
A altura média das plantas (cm) em diferentes tratamentos com inoculação de *Azospirillum brasilense, Methylobacterium symbioticum* e a combinação de ambos, sob duas condições de manejo hídrico: sequeiro e irrigado é apresentada na figura 2. Observa-se que a testemunha em sequeiro apresentou a menor altura (230 cm), diferindo significativamente dos demais tratamentos (b), o que evidencia a sensibilidade da cultura à disponibilidade de água e sua influência no desenvolvimento vegetativo. Já a testemunha irrigada alcançou maior altura (250 cm), com médias semelhantes às dos tratamentos inoculados, reforçando a importância da irrigação no crescimento das plantas.

Tabela 1. Valores de f calculado para as variáveis respostas obtidas em função dos fatores avaliados no experimento.

Fatores	Alt.Pl.	N°.GE	MMG	Prod.
Inoc.	0,00*	0,06^{ns}	0,01*	0,00*
Reg. hídr.	0,00*	0,00*	0,81^{ns}	0,00*
Inoc. x Reg. hídr.	0,17^{ns}	0,95^{ns}	0,34^{ns}	0,61^{ns}
CV (%)	2,18	1206	2,70	2,58
DMS	9,20	142,86	16,28	7,39

Onde: Inoc.: inoculações. Reg.Hídr: regimes hídricos. Inoc. x Reg.Hídr: Análise da interação dos fatores sobre a variável resposta. CV: coeficiente de variação (%). DMS: diferença mínima significativa. Alt.: altura das plantas; Acam.: acamamento das plantas. Umid.: umidade dos grãos na colheita. MMG: massa de mil grãos. Prod.: produtividade de grãos. EUA: eficiência de uso da água. *Efeito significativo, quando Pr<0,05. ns Efeito não significativo, quando Pr>0,05. Fonte: Autores (2025).

Figura 2 - Altura das plantas de milho em função da inoculação e dos regimes hídricos.



*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05), sendo que, as letras maiúsculas comparam as diferenças entre os regimes hídricos dentro de uma mesma inoculação, enquanto, as letras minúsculas comparam as diferenças entre as inoculações em um mesmo regime hídrico. Fonte: Autores (2025).

Nos tratamentos inoculados, tanto em sequeiro quanto em irrigado, verificou-se incremento na altura das plantas em relação à testemunha de sequeiro, indicando que as bactérias atuaram como promotoras de crescimento, possivelmente por meio da síntese de fitohormônios e maior absorção de nutrientes. Ressalta-se que não houve diferença significativa entre os inoculantes, nem entre sequeiro e irrigado quando inoculados (a). Isso demonstra que a inoculação contribuiu para atenuar os efeitos da limitação hídrica, garantindo alturas semelhantes às obtidas sob irrigação plena. Tal resultado é relevante, pois evidencia o potencial dos inoculantes como estratégia sustentável para mitigar os impactos do estresse hídrico.

Na figura 3, observa-se o número de grãos por espiga em função dos tratamentos. A testemunha em sequeiro apresentou o menor valor (570), diferindo estatisticamente de todos os demais (Bb), o que confirma o impacto negativo do déficit hídrico sobre a formação de grãos, fator determinante para o rendimento do milho. A

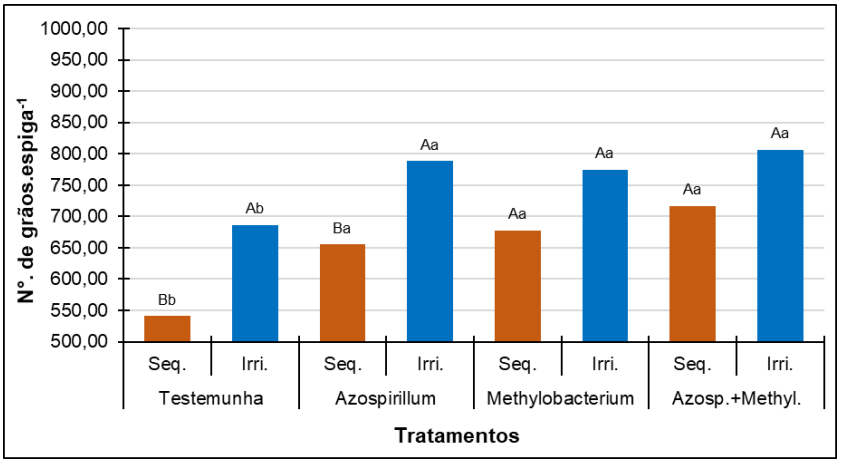
ISBN 978-65-990392-6-3

testemunha irrigada obteve aumento no número de grãos (≈720), superando a testemunha em sequeiro, embora ainda abaixo dos valores registrados nos tratamentos inoculados. Isso indica que apenas a disponibilidade de água não foi suficiente para maximizar o potencial reprodutivo.

Na testemunha sob efeito de irrigação, houve um aumento dos números de grãos por espiga com valores próximos a 720 grãos por espiga, sendo superior estatisticamente da testemunha em sequeiro, mesmo assim abaixo dos valores registrados nos tratamentos inoculados.

Nos tratamentos inoculados, tanto em sequeiro quanto em irrigado, os valores ficaram entre 800 e 850 grãos por espiga, sem diferenças significativas entre bactérias ou regimes hídricos (Aa). Esses resultados mostram que a inoculação reduziu os efeitos do déficit hídrico, mantendo a produção de grãos em níveis próximos ao irrigado. O benefício está associado à capacidade das bactérias em estimular o crescimento vegetal, melhorar a absorção de nutrientes, ampliar o desenvolvimento radicular e favorecer o enchimento dos grãos.

Figura 3 - Número de grãos por espiga da cultura do milho em função da inoculação e dos regimes hídricos.

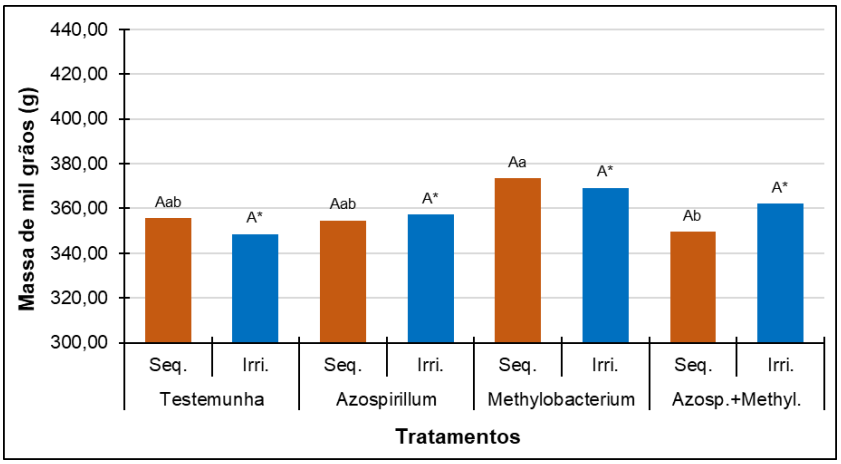


*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05), sendo que, as letras maiúsculas comparam as diferenças entre os regimes hídricos dentro de uma mesma inoculação, enquanto, as letras minúsculas comparam as diferenças entre as inoculações em um mesmo regime hídrico. Fonte: Autores (2025).

Na figura 4, a massa de mil grãos apresentou diferenças em função dos tratamentos. A testemunha em sequeiro registrou o menor valor (340 g), diferindo da testemunha irrigada e dos tratamentos inoculados (Ab), evidenciando que o estresse hídrico reduziu o enchimento de grãos. A testemunha irrigada alcançou 360 g, classificada como (Aa), estatisticamente semelhante à maioria dos tratamentos com inoculação, confirmando o efeito positivo da irrigação no peso dos grãos.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 4 – Massa de mil grãos da cultura do milho em função da inoculação e dos regimes hídricos.



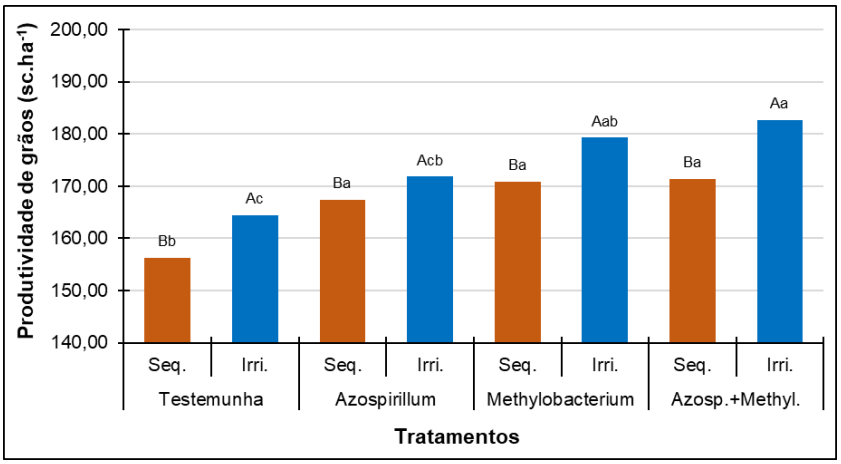
*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05), sendo que, as letras maiúsculas comparam as diferenças entre os regimes hídricos dentro de uma mesma inoculação, enquanto, as letras minúsculas comparam as diferenças entre as inoculações em um mesmo regime hídrico. Fonte: Autores (2025).

Nos tratamentos inoculados, em ambos os regimes hídricos, os valores variaram de 360 a 380 g, sem diferenças significativas entre bactérias ou manejo (Aa). Isso demonstra que a inoculação contribuiu para manter a massa dos grãos mesmo sob estresse hídrico. Diferentemente do número de grãos por espiga, a massa de mil grãos mostrou-se mais estável, sendo menos influenciada por práticas de manejo. Ainda assim, os resultados indicam que a inoculação favoreceu o enchimento de grãos em condições limitantes de água, evitando reduções mais severas no peso.

A produtividade de grãos variou em função das inoculações e dos regimes hídricos (figura 5). A irrigação promoveu incremento em todos os casos, confirmando a importância da disponibilidade de água. A testemunha irrigada evidenciou esse efeito, enquanto os tratamentos com inoculação proporcionaram ganhos adicionais, inclusive em sequeiro, destacando a eficiência dos bioinsumos na redução dos impactos do déficit hídrico.

Entre os tratamentos, *Azospirillum brasilense* e *Methylobacterium symbioticum* apresentaram melhor desempenho sob irrigação, resultando em maior produtividade. Esse efeito pode ser atribuído à fixação biológica de nitrogênio, produção de fitohormônios e indução de tolerância a estresses. Estudos relatam que a associação de diferentes bactérias promotoras de crescimento é mais eficiente do que o uso isolado. No sequeiro, embora as diferenças entre inoculantes não tenham sido tão expressivas quanto no irrigado, todos superaram a testemunha. Isso reforça que a inoculação é uma estratégia eficaz tanto em condições ideais quanto em cenários de limitação hídrica, contribuindo para a sustentabilidade produtiva.

Figura 5 – Produtividade de grãos da cultura do milho em função da inoculação e dos regimes hídricos.



*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05), sendo que, as letras maiúsculas comparam as diferenças entre os regimes hídricos dentro de uma mesma inoculação, enquanto, as letras minúsculas comparam as diferenças entre as inoculações em um mesmo regime hídrico. Fonte: Autores (2025).

4 CONCLUSÃO

A inoculação com *Azospirillum brasiliense, Methylobacterium symbioticum* e a combinação dos dois proporcionaram ganhos adicionais nas plantas de milho mesmo em condições de sequeiro. A utilização da irrigação resultou em ganhos significativos na altura das plantas, no número de grãos por espiga e na produtividade de grãos.

Embora não tenham sido verificadas diferenças significativas entre os diferentes inoculantes testados, todos mostraram efeito positivo em comparação à testemunha, reforçando o potencial do uso de bactérias como tecnologia complementar ao manejo hídrico.

Dessa forma, conclui-se que a integração entre práticas de irrigação e uso da inoculação com bioinsumos microbianos representam uma estratégia promissora para elevar a produtividade de grãos da cultura do milho, contribuindo para a sustentabilidade do seu cultivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) pela disponibilização da Estação Agronômica, cuja estrutura foi fundamental para a condução e execução deste experimento.

REFERÊNCIAS

AHMAD, A.; KHAN, S.; YOUSAF, M.; ALI, R.; SHAH, Z. Sustainable nitrogen management in maize cropping systems: insights into efficiency and environmental impacts. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 208, n. 3, p. 215-228, 2022.

BAUM, M.; RODRIGUES, L. F.; ALMEIDA, C. P. Advances in nitrogen fertilization and water management to improve maize yield in South America. **Field Crops Research**, v. 248, p. 107713, 2020.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MÜLLER, A. G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 41, n. 2, p. 243-249, fev. 2004.

BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L. M. G. Estimativa das necessidades hídricas do milho através de dados agrometeorológicos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 35-41, 2001.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2019/20**. Brasília, 2019.

CONLEY, D. J.; PAERL, H. W.; HOWARTH, R. W.; BOESCH, D. F.; SEITZINGER, S. P.; HAVENS, K. E.; LANCELOT, C.; LIKENS, G. E. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. **Science**, Washington, v. 323, n. 5917, p. 1014-1015, 2009.

DJAMAN, K.; ALLEN, S.; DJAMAN, D.; IRMAK, S. Planting date and plant density effects on maize growth, yield, and water use efficiency. **Environmental Challenges**, Amsterdam, v. 6, 100417, 2022.

DOURADO, M. N.; MARTINS, P. F.; QUECINE, M. C.; ANDRADE, D. A.; ARAÚJO, W. L. Bactérias promotoras de crescimento vegetal: fixação biológica de nitrogênio e síntese de hormônios. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 6, p. 1673-1683, 2015.

EICHOLZ, E. D.; et al**. Informações técnicas para o cultivo do milho e sorgo na região subtropical do Brasil:** safras 2019/20 e 2020/21. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2020.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2018.

ESPADA, P. V. S. **Importância dos fertilizantes foliares na produtividade do milho e da soja**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) – Universidade Norte do Paraná, Londrina, 2021.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Fenômeno La Niña se aproxima do fim e entra na fase neutral**. Brasília, 2025. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br. Acesso em: 16 jun. 2025.

IRGA – Instituto Rio Grandense do Arroz. **Neutralidade no Oceano Pacífico está presente desde meados de fevereiro**. Porto Alegre, 2025. Disponível em: https://irga.rs.gov.br. Acesso em: 04 jun. 2025.

KAPPES, C.; ARF, O.; ANDRADE, J. A. C. Produtividade do milho em condições de diferentes manejos do solo e de doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1310-1321, 2013.

MADHAIYAN, M.; et al. Leaf-residing Methylobacterium species fix nitrogen and promote biomass and seed production in Jatropha curcas. **Biotechnology for Biofuels**, London, v. 8, p. 1-11, 2015.

ISBN 978-65-990392-6-3

MATZENAUER, R. **Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul**. 1994. 172 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; et al. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEPAGRO, 2002.

MÁXIMO, P. J. de M.; ALMEIDA, T. R.; SANTOS, V. F. Resposta do milho à adubação nitrogenada em cobertura em diferentes híbridos. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 62, n. 2, p. 45-52, 2019.

REVILLA, P.; et al. Genetic improvement for drought tolerance in maize: recent advances and prospects. **Euphytica**, Wageningen, v. 217, n. 4, p. 1-15, 2021.

WANG, J. Advances in sustainable maize production under water stress: physiological and molecular perspectives. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 13, p. 1-12, 2022.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 35

PRODUTIVIDADE DO MILHO (*Zea mays*) SOB AGRICULTURA DE PRECISÃO INFLUENCIADA POR CULTURAS ANTECESSORAS E FONTES NITROGENADAS

MAIZE (Zea mays) PRODUCTIVITY UNDER PRECISION AGRICULTURE AS INFLUENCED BY PRECEDING CROPS AND NITROGEN SOURCES

Henrique Onofre Cerbaro[1], Antônio Luiz Santi[2], Alexandre Wahlbrinck Volz[3], Renan da Rosa[3], Thais Camila[3], Mauricio Vian[3], Gilvan Moisés Bertollo[3], João Vittor Haefliger Camargo[3]

[1] Universidade federal de Santa Maria – Campus de Frederico Westphalen – Departamento de Ciências Agrárias, BR386 KM Linha 7 de Setembro, 98400000, Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul, Brasil, henrique.cerbaro@acad.ufsm.br, renandarosa1@gmail.com, santi_pratica@yahoo.com.br, griebler.thais@acad.ufsm.br, mauricio.vian@acad.ufsm.br, joao.haefliger@acad.ufsm.br, gilvanmbertollo@gmail.com

RESUMO

O milho (*Zea mays*) é o cereal mais cultivado no Brasil, com 20,9 milhões de hectares e 112,3 milhões de toneladas produzidas. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de plantas de cobertura e fontes de nitrogênio no rendimento do milho. Foi realizado um experimento a campo na safra 2020/21 com delineamento experimental de blocos ao acaso, subdividindo as parcelas para duas fontes de N. As coberturas utilizadas foram aveia preta, nabo, azevém e quatro consórcios com aveia, centeio e ervilhaca. As fontes de N testadas foram ureia convencional e protegida comercial da Zarcos. Foram analisados diâmetro e comprimento de espiga, número de fileiras, grãos por fileira, peso e produtividade. Melhores resultados foram observados com aveia preta, azevém, nabo e os consórcios 2 e 4. Esses sistemas de cobertura aumentaram comprimento e peso da espiga e número de grãos por fileira. A ureia convencional e a protegida apresentaram desempenho semelhante na maioria dos parâmetros avaliados. Diferenças significativas entre fontes de N ocorreram apenas de forma isolada. O diâmetro da espiga e o número de fileiras não foram influenciados pelos tratamentos.

Palavras chave: Plantas de cobertura. Milho. *Zea mays*. Fontes de nitrogênio.

ABSTRACT

Corn (*Zea mays*) is the most cultivated cereal in Brazil, with 20.9 million hectares and a production of 112.3 million tons. In the 2020/21 season, the effect of cover crops and nitrogen sources on corn yield was evaluated. The experimental design was a randomized block, subdividing the plots for two nitrogen sources. The cover crops used were black oat, radish, ryegrass, and four mixtures with oat, rye, and vetch. The nitrogen sources tested were urea (conventional) and Unera (protected). The variables analyzed were ear diameter and length, number of rows, kernels per row, ear weight, and yield. Better results were observed with black oat, ryegrass, radish, and mixtures 2 and 4. These cover crop systems increased ear length, ear weight, and number of kernels per row. Urea and Unera showed similar performance in

ISBN 978-65-990392-6-3

most of the parameters evaluated. Significant differences between nitrogen sources occurred only in isolated cases. Ear diameter and number of rows were not influenced by the treatments.

Keywords: Cover crops. Corn. Zea mays. Nitrogen sources.

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays L.*) é reconhecido como uma das culturas de maior importância para a produção brasileira, sobre sua origem acredita-se que a teve origem no México com a descendência de uma planta perene conhecida como teosinto (*Zea mays* spp parviglumis) domesticada a cerca de 9000 anos atrás (rehagro,2025). Nos dias de hoje é um dos principais cereais cultivados no Brasil, presente em todas as regiões e essencial tanto para a alimentação humana e animal quanto para a indústria. Devido às suas características fisiológicas, apresenta alto potencial produtivo, mas sua eficiência depende de práticas adequadas de manejo e conservação do solo. O milho é uma cultura de grande importância, sendo que no Brasil são cultivados cerca de 20.895,6 mil hectares com uma produção estimada de 112.342,8 mil toneladas, sendo assim, o cereal mais cultivado do país, e que apenas no estado do Rio Grande do Sul são cultivados cerca de 824,1 mil hectares, produzindo cerca de 2.984,1 mil toneladas do grão, representando cerca de 3,94% da área plantada e 2,85% da produção do país (CONAB, 2022).

O Sistema Plantio Direto (SPD), iniciado no Brasil em 1972, é um marco da agricultura conservacionista. Ele reduz o revolvimento do solo, mantém cobertura vegetal permanente e promove a rotação de culturas. Esses princípios aumentam a infiltração de água, reduzem a erosão e favorecem a vida do solo, garantindo maior sustentabilidade à produção de milho e de outros grãos (EMBRAPA, 2022). Hodiernamente o plantio direto visa a proteção do solo através do acúmulo de material vegetal e mineralização de palhadas em sua superfície, que são manejos para o controle de pragas, doenças, e vetores devido ao estímulo aos antagonistas naturais para o controle de diversas espécies de fungos e vetores de injúrias. Aliás, na cultura do milho deve-se estar atento a rota da cigarrinha e ao o complexo de enfezamentos que comprometem o estande de plantas e podem causar acamamentos, principalmente a partir do estágios do milho no palito (VE) até a oitava folha(V8) Também serve para substituir do sistema algumas operações de preparo do solo como a gradagem, aração, subsolagem e escarificação, para que então seja semeada a cultura seguinte, Desse modo, a eficiência do plantio direto não deve ser visto como uma receita única e universal, devendo-se realizar adaptações locais (BERTIN et al., 2005).

De acordo com Cati (1997) o baixo rendimento de culturas comerciais muitas vezes está relacionado ao uso intensivo do solo, que pode o levar a sua degradação, compactação e redução da macro e micro fauna e consequente disponibilidade de nutrientes devido ao fato de que os nutrientes extraídos pelas plantas não tiveram uma reposição através da adubação. Para que se obtenha uma boa produtividade de grãos, necessita-se fazer um planejamento e realizar a adubação adequada para cada cultivo, tendo em vista as necessidades do solo, especialmente para o milho que

demanda uma grande quantidade de nutrientes, em especial o nitrogênio, tornando-se uma cultura de custo elevado. Nesse sentido é eficaz realizar práticas conservacionistas, como a manutenção da palhada no solo, o uso de plantas de cobertura e a diversificação de culturas, reduzem essas perdas ao melhorar a matéria orgânica, a infiltração de água e a atividade microbiana, promovendo maior ciclagem de nutrientes. Desta forma, as práticas culturais de rotação de culturas e a adubação verde utilizadas no sistema de plantio direto são algumas das estratégias inteligentes para se ter incrementos de matéria orgânica e nitrogênio nas camadas superiores do solo.

O nitrogênio derivado do petróleo e fonte comercial das recomendações de adubação é um dos nutrientes mais limitantes no solo e um dos mais requeridos e absorvidos pelas plantas cultivadas, de modo que, a uréia que é a fonte de nitrogênio mais empregada no Brasil apresenta algumas desvantagens, como a possibilidade de perdas de até 50% do nitrogênio por volatilização de amônia NH_3, e perdas por lixiviação devido a alta mobilidade desse macronutriente no solo e na nas plantas. Por isso, uma prática eficaz é trabalhar com a incorporação desse nutriente no solo (CANTARELLA, 2007). O nitrogênio (N) é vital para o crescimento das plantas, participando da formação de proteínas e ácidos nucleicos. Porém, no solo agrícola, sua disponibilidade é frequentemente limitada, resultando em baixas eficiências de uso. As principais perdas ocorrem por volatilização, quando a ureia libera amônia para a atmosfera; por nitrificação e lixiviação, quando o nitrato é transportado pela água para além das raízes; e por emissões gasosas, como N_2O.

As principais fontes de fertilizantes nitrogenados disponíveis atualmente são a uréia, o nitrato de amônio, o sulfato de amônio e o nitrato de cálcio, mas outras fontes como o fosfato monoamônico (MAP) e fosfato diamônico (DAP) também contém 11% e 16% de nitrogênio, respectivamente. Dentre estes fertilizantes, a uréia convencional que quando aplicada em superfície, pode apresentar perdas importantes por volatilização de nitrogênio, reduzindo sua eficiência. Uma forma de reduzir essas perdas é recobrir ou incorporar a uréia aditivos, como por exemplo, inibidores de urease e de nitrificação ou o recobrimento dos grânulos com coberturas físicas que não degradem ou alterem a composição do solo. Por exemplo o uso do Escarificador proporcionando menor alterações na solubilidade, microbiota e estrutura do perfil do solo comparado a outros implementos. Esses processos conferem uma estabilidade temporária ao produto (SBCS, 2016).

O uso do termo plantas de cobertura começou a ser mais utilizado a partir de 1980, pois o termo comumente utilizado era adubação verde, mas que visava a incorporação dos resíduos vegetais ao solo, sendo essa uma das premissas que o plantio direto visava abolir. Nesse Sentido , as plantas de cobertura englobam desde o uso de espécies de leguminosas, gramíneas, crucíferas e entre outras para o uso no sistema plantio direto, almejando a formação de uma camada de palha sob o solo visando a sua proteção e análoga descompactação por meio do incremento de sistemas radiculares que colaboram para manutenção do sistemas de galerias e formação de macro e micro poros, pois desta forma se diminui os efeitos negativos da erosão para maior adesão e carreamento de nutrientes nas safras seguintes. Proporcionando redução dos impactos das gotas de chuvas, que desagregam e arrastam as partículas de solo iniciando o processo erosivo (WUTKE et al., 2014).

Logo, plantas de cobertura são fundamentais no SPD. Gramíneas, como a braquiária, fornecem grande volume de palhada de decomposição lenta, protegendo o solo. Já leguminosas, como a crotalária, fixam biologicamente o nitrogênio, enriquecendo a fertilidade. O consórcio entre elas potencializa a proteção contra erosão, a retenção de água e a ciclagem de nutrientes, beneficiando diretamente a produtividade do milho.

Os consórcios de espécies de plantas de cobertura devem, além de proteger o solo e de adicionar nitrogênio, proporcionar uma produção de massa seca (MS) cuja relação carbono/nitrogênio (C/N) seja intermediária, ou seja, em torno de 20 a 30 g/Kg de N àquelas das espécies em cultivos isolados, e com isso obtendo uma taxa de decomposição dos resíduos culturais menor que com leguminosas. ou com nabo, e proporcionando uma cobertura de solo por mais tempo e sincronia entre fornecimento e demanda de nitrogênio pelas culturas comerciais (GIACOMINI et al., 2003).Da mesma forma que se buscam por plantas de cobertura com relação C/N equilibrada, o uso de fertilizantes nitrogenados que possam oferecer alguma forma de proteção as perdas de nitrogênio ao ambiente e liberação gradual, também podem contribuir ao fornecimento de nitrogênio de forma controlada e com um maior tempo de cobertura do solo com menor mineralização precoce da palhada adicionada ao SPD pelas plantas de cobertura. Assim, contribui-se de forma positiva a produtividade das culturas subsequentes, principalmente de gramíneas como o milho.

Nesse viés, o presente trabalho buscou avaliar a resposta de duas diferentes formulações de fertilizantes nitrogenados associados com os cultivos anteriores de diferentes plantas de cobertura de inverno na produtividade da cultura do milho. Foram quantificadas as influências de sete diferentes sistemas de cobertura sobre a produtividade da cultura do milho. E avaliadas duas fontes nitrogenadas sobre a produtividade da cultura do milho. Nesse sentido, as plantas de cobertura são fundamentais para a agricultura conservacionista, pois protegem o solo contra erosão, melhoram a infiltração e retenção de água, aumentam a matéria orgânica e contribuem para a ciclagem de nutrientes. No Brasil, diversas espécies vêm sendo utilizadas com destaque:

Aveia preta (*Avena strigosa Schreb*.) – Gramínea anual originária da Ásia e da Europa, com bom perfilhamento e rápido crescimento. É amplamente utilizada no Sul do Brasil, tanto como forragem quanto como cobertura do solo, garantindo proteção eficiente no inverno. (EMBRAPA TRIGO,2011)

Nabo forrageiro (*Raphanus sativus L*.) – Planta anual da família das brássicas, com raiz pivotante e profunda, capaz de reciclar nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo. Além de melhorar a fertilidade do solo, auxilia na descompactação natural do perfil. (LOPES, 2017)

Centeio (*Secale cereale*) – Gramínea rústica e adaptada a condições menos favoráveis. Sua palhada contribui para a manutenção da matéria orgânica, reduz as perdas de solo por erosão e favorece a retenção de água, sendo uma alternativa importante para cultivo no inverno. (BLANCO CANQUI, H. ET AL, 2023)

Ervilhaca comum (*Vicia sativa L*.) – Leguminosa de raízes profundas e crescimento eficiente, que fornece de 80 a 100 kg ha^{-1} de nitrogênio ao solo. É recomendada em rotação de culturas, especialmente antes do milho e da soja, devido à rápida decomposição de sua biomassa.

Aveia branca (*Avena sativa L.*) – Muito utilizada no Sul do Brasil, tanto em cobertura do solo quanto na integração lavoura-pecuária. Apresenta efeito alelopático, auxiliando no manejo de plantas daninhas e reduzindo a necessidade do uso de herbicidas. (CRUSCIOL, C. A. C., ET AL. (2023))

Azevém (*Lolium multiflorum*) – Gramínea anual de alta rusticidade e boa capacidade de perfilhamento, utilizada como forragem e cobertura em lavouras e pomares. Garante excelente proteção ao solo, embora apresente crescimento inicial mais lento em comparação à aveia.(GARCIA, R. A., ET AL. (2021))

Todavia, uso dessas espécies, isoladas ou em consórcios, favorece o equilíbrio entre produção de biomassa e ciclagem de nutrientes, aumentando a sustentabilidade e a eficiência dos sistemas de produção agrícola

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O experimento foi conduzido no ano agrícola 2020/2021 no município de Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brasil (27°23′26″S, 53°25′43″W, 481 m de altitude), na área experimental da UFSM-FW. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS et al., 2013) e o clima é do tipo Cfa, segundo Köppen (ALVARES et al., 2013).

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso (DBA) com arranjo bifatorial em parcelas subdivididas (7 m × 3,5 m) com 14 repetições. O primeiro fator consistiu nos diferentes sistemas de plantas de cobertura: aveia preta (*Avena strigosa*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), azevém (*Lolium multiflorum*) de forma solteiras. Ademais, as plantas de coberturas que foram consorciadas foram (consórcio 1) aveia preta + nabo + centeio (*Secale cereale*);(consórcio 2) aveia branca (*Avena sativa* L.) + ervilhaca + centeio; (consórcio 3) nabo + centeio + ervilhaca (*Vicia sativa* L.); (consórcio 4) aveia branca + ervilhaca + nabo. O segundo fator foi a aplicação de duas fontes de fertilizantes nitrogenados: convencional (uréia) e protegida (produto comercial Unera, da Zarcos).

As dimensões das parcelas eram de 7m x 3,5m para plantas de cobertura e sub-divididas em 3,5 m por 3,5 m para as fontes de N. Desta forma, totalizou-se 28 repetições para cada sistema de cobertura, sendo 14 repetições para o sistema de cobertura adubado com uréia e outros 14 adubados com Unera, dentro de uma área maior com 196 parcelas e sete diferentes sistemas de cobertura.

As plantas de cobertura foram semeadas em 13 de abril de 2020, com espaçamento de 17 cm entre linhas, e dessecadas em 10 de setembro de 2020 com glifosato (1440 g e.a ha^{-1}), cerca de 35 dias antes da semeadura do milho. O milho (*Zea mays*), híbrido Dekalb 255 VT PRO3, foi semeado em 15 de outubro de 2020, com população final de 71.000 plantas ha^{-1} e adubação de base de 300 kg ha^{-1} de NPK 10-20-20. Entre os estádios V2-V3, aplicou-se atrazina (2000 g i.a ha^{-1}) para controle de plantas daninhas. As aplicações de N foram realizadas nos estádios V4-V6 e V7-V8, totalizando 400 kg ha^{-1} para cada fonte.

2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados

ISBN 978-65-990392-6-3

A colheita do milho foi manual, coletando-se duas linhas centrais de três metros de comprimento em cada parcela para determinação da produtividade. Para avaliação dos componentes de rendimento, dez espigas foram selecionadas aleatoriamente por parcela e analisadas em laboratório, utilizando balança de precisão, paquímetro, réguas e contador automático de sementes (MOTOMCO®). A umidade dos grãos foi corrigida para 13%.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA). A comparação de médias foi realizada pelo teste de Scott & Knott (1974), com nível de significância de 5%, utilizando o software SISVAR.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados

Na tabela 1 foram avaliados o diâmetro e o comprimento das espigas após os sistemas de cobertura. Inferiu-se que não houve diferença nos sistemas de coberturas quando associados com ureia. Ao passo que ao se utilizar a Unera nos consórcios 1 e 3 os resultados estatisticamente formam inferiores aos demais (tabela 1).

Tabela 1 – Análise das variáveis de diâmetro de espiga e comprimento de espiga da cultura do milho, híbrido Dekalb 255 VT PRO 3, safra 2020/2021 no município de Frederico Westphalen-RS.

	Diâmetro de espiga (cm)		Comprimento de espiga (cm)	
Sistemas de cobertura	**Uréia**	**Unera**	**Uréia**	**Unera**
Aveia preta	41,1 Aa	40,5 Aa	12,9 Aa	13,6 Ca
Azevém	39,8 Aa	40,2 Aa	13,7 Ab	15,1 Aa
Nabo	38,6 Aa	40,8 Aa	14,1 Aa	14,5 Ba
Consórcio 1	38,2 Aa	38,6 Ba	12,9 Aa	12,6 Ca
Consórcio 2	40,1 Aa	40,5 Aa	13,3 Aa	13,9 Ca
Consórcio 3	40,0 Aa	37,5 Bb	13,0 Aa	13,1 Ca
Consórcio 4	39,1 Aa	40,4 Aa	13,8 Aa	14,6 Aa

LEGENDA: Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-knott a 5% de probabilidade. (consórcio 1) aveia preta + nabo + centeio; (consórcio 2) aveia branca + ervilhaca + centeio; (consórcio 3) nabo + centeio + ervilhaca; (consórcio 4) aveia branca + ervilhaca + nabo.

Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

Ao comparar as diferentes fontes de N associadas a cada sistema, observa-se diferença estatística somente com o consórcio 3, onde o diâmetro de espiga foi de 40 cm ao utilizar uréia, enquanto ao empregar a Unera o diâmetro de espiga foi de apenas 37,5 cm. Com exceção dos consórcios 1 e 3 adubados com Unera que obtiveram resultados estatísticos inferiores, todos os outros não tiveram diferenças significativas. Segundo Goes et al. (2012), o diâmetro da espiga está estreitamente relacionado com o enchimento de grãos e com o número de fileiras na espiga (tabela 2), que neste trabalho não obteve diferença estatística significativa, e que são influenciados principalmente pela genética da planta. Este mesmo autor não observou efeito significativo para esta variável no milho safrinha adubado com uréia e sulfato de amônio, nas doses de 0, 20, 40, 60 e 80 kg N ha^{-1}.

Na tabela 2 foram analisados o número de fileiras na espiga e de grãos na fileira de milho após os sistemas de coberturas. Em relação a variável número de fileiras na espiga, não houve diferenças estatísticas, tanto com Ureia quanto com Unera. Enquanto que o único tratamento que obteve resultado inferior, analisando as fontes de N dentro dos sistemas de cobertura, foi o milho após o consórcio 3 adubado com uréia convencional, ao qual foi obtido 16 fileiras na espiga enquanto o mesmo sistema adubado com Unera teve 17 fileiras na espiga (tabela 2).

Tabela 2 – Análise das variáveis de número de fileiras na espiga e número de grãos na fileira da cultura do milho, híbrido Dekalb 255 VT PRO 3, safra 2020/2021 no município de Frederico Westphalen-RS.

	N° fileiras na espiga		N° Grãos na fileira	
Sistemas de cobertura	**Uréia**	**Unera**	**Uréia**	**Unera**
Aveia preta	16 Aa	16 Aa	25,2 Ba	25,6 Ba
Azevém	16 Aa	16 Aa	25,8 Ab	29,7 Aa
Nabo	16 Aa	16 Aa	27,4 Ab	29,4 Aa
Consórcio 1	15 Aa	16 Aa	23,4 Ba	24,7 Ca
Consórcio 2	16 Aa	16 Aa	27,4 Aa	28,5 Aa
Consórcio 3	16 Ab	17 Aa	24,5 Ba	24,1 Ca
Consórcio 4	16 Aa	16 Aa	27,3 Aa	28,4 Aa

LEGENDA: Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-knott a 5% de probabilidade. (consórcio 1) aveia preta + nabo + centeio; (consórcio 2) aveia branca + ervilhaca + centeio; (consórcio 3) nabo + centeio + ervilhaca; (consórcio 4) aveia branca + ervilhaca + nabo.

Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

Na tabela 3 são avaliados o peso da espiga e a produtividade após sistemas de cobertura. Tanto os tratamentos adubados com uréia quanto adubados com Unera os tratamentos que tiveram os melhores resultados foram após os sistemas com azevém, nabo e o consórcio 4.

Enquanto que todos os outros tratamentos com uréia foram inferiores, sendo o pior o consórcio 1 com 90 gramas por espiga. Consecutivamente nos tratamentos com Unera, com exceção do milho pós azevém adubado com uréia ao comparar as diferentes fontes de N dentro dos sistemas de cobertura, teve diferença estatística inferior em relação a parcela adubada com Unera, de 145,9 gramas por espiga na parcela com Unera para 131,5 gramas por espiga na parcela com uréia. Já os outros tratamentos não diferiram estatisticamente para fontes de N dentro dos sistemas de cobertura (tabela 3). O peso de espiga interfere diretamente na produtividade da cultura, sendo um dos componentes de produtividade mais importante.

Tabela 3 – Análise das variáveis de peso de espiga e produtividade de grãos da cultura do milho, híbrido Dekalb 255 VT PRO 3, safra 2020/2021 no município de Frederico Westphalen-RS.

	Peso de espiga (g)		**Produtividade (kg há$^{-1}$)**	
Sistemas de cobertura	**Uréia**	**Unera**	**Uréia**	**Unera**
Aveia preta	117,2 Ba	115,8 Ba	5.081 Ba	5.138 Aa
Azevém	131,5 Ab	145,9 Aa	5.635 Aa	5.068 Aa
Nabo	136,6 Aa	147,2 Aa	5.543 Aa	5.626 Aa
Consórcio 1	90,00 Ca	96,4 Ca	4.071 Ba	4.269 Ba
Consórcio 2	114,0 Ba	122,6 Ba	5.014 Ba	5.402 Aa
Consórcio 3	105,5 Ba	95,6 Ca	4.741 Ba	3.956 Bb
Consórcio 4	140,4 Aa	144,1 Aa	5.627 Aa	4.816 Ab

LEGENDA: Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-knott a 5% de probabilidade. (consórcio 1) aveia preta + nabo + centeio; (consórcio 2) aveia branca + ervilhaca + centeio; (consórcio 3) nabo + centeio + ervilhaca; (consórcio 4) aveia branca + ervilhaca + nabo.

Fonte: Autores (2025).

Analisando a produtividade, na tabela 3 observa-se que os tratamentos adubados com uréia que obtiveram os melhores resultados foram após os sistemas com azevém, nabo e o consórcio 4, enquanto nos tratamentos adubados com Unera os sistemas de cobertura que proporcionaram os melhores resultados para o milho

foram após a aveia preta, azevém, nabo e os consórcios 2 e 4. Ao comparar cada sistema de cobertura com as duas fontes de N, os piores resultados foram obtidos dentro dos consórcios 3 e 4 adubados com Unera, obtendo produtividades de 3.956 e 4.816 kg há$^{-1}$, enquanto os mesmos sistemas adubados com uréia obtiveram produtividades de 4.741 e 5.627 kg há$^{-1}$, respectivamente, já os outros sistemas de cobertura não apresentaram diferenças estatísticas para as diferentes fontes de N.

3.2 Discussões

Para a variável de comprimento de espiga, avaliando o milho após os sistemas de cobertura associadas a uréia, observa-se que não diferiram estatisticamente, enquanto nos sistemas de cobertura associados a Unera, o sistema de cobertura que apresentou o melhor resultado para o milho foi o sistema que continha azevém (tabela 1). Ao avaliar as duas fontes de N, o único tratamento que apresentou um resultado inferior foi o de milho após azevém, adubado com uréia convencional, onde obteve um comprimento de espiga de 13,7 cm em relação aos 15,1 cm no sistema adubado com Unera.

Segundo De Souza et al., (2003), em um experimento conduzido com aveia preta e nabo com doses de 0, 60, 90 e 120 kg N ha^{-1}, as variáveis de diâmetro de espiga e comprimento de espiga não tiveram diferenças estatísticas tanto para plantas de cobertura como para as diferentes doses de N, e Ohland et al., (2005) também não observou diferenças significativas para o comprimento de espiga, sob culturas antecessoras e 5 doses de N, corroborando desta forma com os resultados deste trabalho. Tormen et al. (2016) em trabalho com milho conduzido após aveia, nabo, canola e um consórcio destas três não obteve diferenças significativas para a variável comprimento de espiga.

O comprimento da espiga é diretamente influenciado pelo número de grãos na fileira, e é determinado nas últimas semanas antes do pendoamento, e o estresse hídrico neste momento pode reduzir o número produzidos em cada fileira, entretanto, o número de grãos final só será determinado durante e após a polinização (PIONEER SEMENTES, 2018).

Desta forma, o comprimento de espiga foi influenciado pela polinização dos grãos durante esta fase, e o período seco ajudou na dispersão dos grãos de pólen, sendo que esta variável não foi tão influenciada pela adubação com uréia, já o milho adubado com Unera após azevém apresentou o melhor resultado estatístico, enquanto que os sistemas de cobertura restantes não diferiram entre si para as fontes de N.

Ohland et al. (2005) em um trabalho realizado com milho após ervilhaca peluda, nabo forrageiro e cinco doses de N, não obteve diferença significativa para as doses de N, apenas para as culturas antecessoras, sendo que a ervilhaca peluda teve uma diferença ligeiramente melhor em relação ao nabo forrageiro, e esta mesma autora não observou diferenças significativas para a variável de comprimento de espiga em função das culturas antecessoras e das doses de N.

Os resultados corroboram com os mesmos encontrados por Albuquerque et al., (2013), onde o milho cultivado em sucessão a três espécies de leguminosas como plantas de cobertura e doses de 0 e 80 kg N ha^{-1} também não houve diferença estatística. Ziech et al. (2016) também não obteve resultados significativos para número de fileiras na espiga em função de doses de N e sob cultivo de leguminosas, porém teve uma redução desta variável para milho cultivado após gramíneas e sem adição de N, tendo uma redução de até 30% nesta variável.

Segundo Magalhães e Durães (2006), durante o estádio vegetativo V8 é definido o número de fileiras de grãos na espiga, entretanto, conforme descrito por Ciampitti et al. (2016), está variável é definida entre os estádios V6 a V10, sendo que a mesma pode ser afetada pelo potencial genético e por fatores ambientais neste período e também é muito responsiva a adubação nitrogenada, sendo que no presente trabalho a segunda aplicação nitrogenada foi realizada entre os estádios V6 a V8, e que portanto o fornecimento de N nesta fase pode ter influenciado para que não houvesse diferença significativa nesta variável, independente das melhorias que os sistemas de cobertura possam ter agregado ao solo. O milho tende a ter sempre um número par de fileiras na espiga, devido a divisão celular que ocorre durante o processo reprodutivo (PIONEER SEMENTES, 2018).

Ao avaliar a variável de número de grãos na fileira, os melhores tratamentos adubados com uréia foram após azevém, nabo, e os consórcios 2 e 4. Ao se utilizar da Unera, os melhores tratamentos também foram após os sistemas de cobertura com azevém, nabo e os consórcios 2 e 4. Ao comparar as diferentes fontes de N dentro dos sistemas de cobertura, os tratamentos após azevém e nabo tiveram diferença estatística entre as duas adubações nitrogenadas, sendo que as parcelas com Unera obtiveram os melhores resultados com uma diferença de 29,7 e 29,4 para 25,8 e 27,4 números de grãos na fileira para azevém e nabo, respectivamente (tabela 2), enquanto os outros sistemas de cobertura não tiveram diferenças estatísticas entre fontes de N para cada sistema de cobertura.

Sichocki et al., (2014) observaram que o número de grãos por fileira teve um aumento linear conforme houve o aumento da dose de N, assim como De Godoy et al., (2011), onde houve aumento de número de grãos por fileira até a dose máxima de 130 kg N ha^{-1}.

Valderrama et al., (2014), em um trabalho realizado com uréia convencional e três diferentes tipos de uréia revestidas, tanto para milho safra quanto safrinha, não obteve diferenças estatísticas para a variável de número de grãos na fileira, sendo que as fontes de N não apresentaram diferenças entre a fonte convencional e as protegidas, enquanto que neste trabalho os tratamentos que apresentaram diferenças entres as fontes nitrogenadas foram após azevém e o nabo (tabela 2), porém todos os outros tratamentos independente do sistema de cobertura obtiveram resultados estatísticos iguais para as diferentes fontes de N.

Segundo Magalhães e Durães (2006), o número de grãos na fileira só é definido cerca de uma semana antes do florescimento, sendo uma fase crítica em relação a deficiência de umidade no solo e de nutrientes, desta forma, os sistemas de cobertura influenciaram diretamente no número de grãos na fileira, conseguindo

melhorar os atributos do solo e contribuindo para os resultados, com o nabo e os consórcios 2 e 4 fornecendo nutrientes através da reciclagem e fixação de N, e o azevém provavelmente devido a boa cobertura de palhada no solo, retendo mais água à cultura no período de stress hídrico, mesmo imobilizando parte do N aplicado em cobertura.

Santos et al. (2010) observou que ocorreu um aumento do peso de espiga em parcelas cujas culturas anteriores eram leguminosas, obtendo resultados superiores com e sem fornecimento de N. A explicação provável para os resultados obtidos nesta variável, é de que as parcelas com nabo e com o consórcio 4, que contém plantas com alta capacidade de ciclagem e fornecimento de nutrientes, puderam proporcionar os melhores resultados, e o azevém pode ter proporcionado os melhores resultados com a fonte de N protegida devido a liberação gradual de N e a boa cobertura do solo, por se tratar de uma gramínea de relação C/N alta e mantendo uma cobertura de palha no solo por mais tempo, importante em um ano de estresse hídrico.

O milho apresentou os melhores resultados após os sistemas de cobertura com azevém, nabo e o consórcio 4 para ambas as fontes nitrogenadas, possivelmente devido a uma influência positiva destes sistemas de cobertura independente da fonte de N, enquanto que a aveia preta e o consórcio 2 obteram os melhores resultados dentre os sistemas de cobertura adubados apenas com a fonte de N protegida.

Valderrama et al., (2014), em experimento conduzido com milho safra e milho safrinha não observou diferenças estatísticas para a produtividade entre o milho adubado com uréia convencional e outras três uréias revestidas.

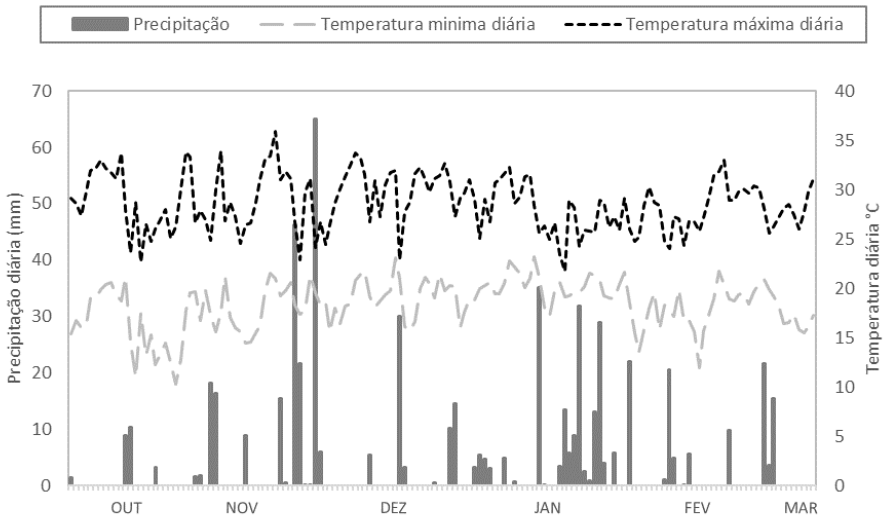
Corroborando parcialmente para os resultados obtidos no trabalho, Giacomini (2004), encontrou resultados semelhantes para os sistemas onde as plantas de cobertura eram leguminosas ou para o nabo solteiro, porém no seu trabalho os resultados para a produtividade do milho em sucessão a gramíneas como a aveia preta foram inferiores, enquanto neste trabalho os tratamentos após aveia preta adubados com a fonte de N protegida, e os tratamentos após azevém adubados com ambas as fontes de N obtiveram os melhores resultados.

A precipitação pluviométrica teve um total acumulado de 569 mm durante o período que compreende desde o plantio do milho em 15 de outubro de 2020 até a colheita em 18 de março de 2021 (figura 1). Segundo Cruz (2006), o milho é uma cultura muito exigente em água, sendo que a quantidade de água consumida pela planta, durante seu ciclo, está em torno de 600 mm, mas a ocorrência de déficit hídrico na cultura do milho pode ocasionar danos em todas as fases, principalmente nos parâmetros reprodutivos. Devido ao período de La Niña em que a cultura estava a campo, a precipitação pluviométrica (figura 1) ocorrida durante o ciclo da cultura foi abaixo do ideal para o milho.

A principal justificativa para que os sistemas de cobertura que possuíam gramíneas obtenham resultados superiores em relação à parcelas com consórcios de plantas com leguminosas, é de que o período de stress hídrico e o baixo teor de umidade no solo tenham contribuído para que o milho não expressasse um bom potencial produtivo, sendo então que a água foi o fator limitante, e possivelmente o N

não foi utilizado em sua totalidade devido ao milho não conseguir fazer o uso do mesmo devido as adversidades climáticas.

Figura 1 – Temperaturas médias diárias e precipitação diária durante a condução do experimento, safra 2020/2021. Precipitação pluviométrica (mm) e temperaturas mínimas e máximas do ar (°C) diárias durante a condução do experimento (safra 2020/2021).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025). Dados obtidos do INMET, Estação de Frederico Westphalen/RS.

Pela boa capacidade de reciclagem de nutrientes como fósforo e N, o nabo forrageiro se torna uma planta de cobertura vantajosa antecedendo a produção de milho (CROCHEMORE E PIZA, 1994), e segundo Santos e Reis (2001), o nabo pode reciclar até 135 kg N ha^{-1}, contribuindo positivamente para a produtividade de milho independente da fonte de N. Da mesma forma, as leguminosas presentes nos consórcios 2 e 4 podem também ter contribuído com os resultados, enquanto o azevém e aveia preta proporcionaram boa cobertura de solo neste período de estresse hídrico.

4 CONCLUSÃO

Os tratamentos que apresentaram os melhores resultados para as variáveis analisadas de comprimento de espiga, peso de espiga, número de grãos na fileira e produtividade foram após os sistemas de cobertura com aveia preta, azevém, nabo e os consórcios 2 (aveia branca + ervilhaca + centeio) e o consórcio 4 (aveia branca + ervilhaca + nabo).

A fonte de N protegida, de forma geral, não apresentou resultados significativamente melhores que a fonte de N convencional, tendo apenas diferenças estatísticas de forma isolada dentro dos sistemas de cobertura, para as variáveis analisadas de comprimento de espiga, peso de espiga, número de grãos na fileira e produtividade. Já as variáveis de diâmetro de espiga e número de fileiras na espiga não tiveram influência dos sistemas de cobertura e das fontes nitrogenadas.

Consecutivamente o manejo correto e temporal em escalonar cultivares é uma das estratégias ao se trabalhar com variedades superprecoces. Conforme o experimento a quantidade de chuvas não atendeu a expectativa da cultivar utilizada o Híbrido DKB 255 PRO3®, superprecoce,que apesar de apresentar excelente arranque inicial é muito dependente de água nas fases de enchimento de grãos sendo nessa fase imprescindível a disponibilidade hídrica e de recursos assimiláveis. Logo, tendo em vista o cenário climático a semeadura poderia ter sido posta em momento mais oportuno conforme dados do Inmet para evitar a falta de 30 mm a menos de chuvas que na safra seguinte somente consórcios com aveia branca (*Avena sativa* L) obtiveram os resultados mais promissores.

Contudo, cabe destacar sobre a importância do uso de coberturas corretas no SPD para o plantio do milho como o nabo , centeio , ervilhaca e aveia preta sendo que o primeiro é de grande importância na ciclagem do Nitrogênio para o a safra posterior. Enquanto que o Centeio e aveia preta favorecem a formação de palhada e eventual incremento de matéria orgânica, ou seja, maior relação C/N no sistema de cultivo. Nesse cenário, com eventual déficit hídrico a proteção do solo com palhada foi crucial para evitar o aumento da temperatura no solo e consequente stress hídrico. Do mesmo modo, Infere-se que indiretamente o uso de aveia branca teve promissor controle alelopático evitando maior stress ao milho. Assim como a mineralização de matéria orgânica nos consórcios com centeio e aveia preta foram fundamentais para a disponibilidade de nutrientes que se mantém adsorvidos aos coloides do solo sendo assimiláveis às plantas. Assim obteve-se melhores ganhos em comprimento de espiga, número de grãos por fileira e produtividade conforme demonstrou o experimento a campo

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho só foi possível devido a colaboração de diversas pessoas com apoio, paciência, e compreensão ao longo desta trajetória. A partir deste trabalho, surgirá uma nova trajetória ao qual com a cooperação e dedicação pretendo seguir alcançando novos horizontes e conquistas. Assim expresso um forte agradecimento e apoio a todos que estiveram junto comigo nos dias de luta e hoje e com o coração alegre expresso esse agradecimento.

Primeiramente explicito as salvas a Instituição de ensino UFSM campus de Frederico Westphalen ao qual possibilitou através do ensino local, aos seus docentes, direção, administração e aos demais funcionários que trabalham com dedicação e empenho em prol do ensino superior de qualidade a viabilidade para iniciar o desenvolvimento deste incrível trabalho.

Ademais a toda equipe e membros do Laboratório de Agricultura de de Precisão (LAPSUL) aos meus amigos e colegas de laboratório Maurício Vian, Amanda, Willian, Júlio, Luís, ao mestrando Renan da Rosa e ao nosso professor orientador Antônio Luiz Santi.

Da mesma forma as empresas patrocinadoras dos insumos próximas a Região de Frederico Westphalen a Agricenter e Cotrifred respectivamente pelo fornecimento de Uréia convencional e protegida da marca Zarcos e alguns equipamentos como o contador de sementes automático da marca MOTOMCO®.

Assim, presto meu agradecimento a todos os parceiros e entidades envolvidas para a elaboração do trabalho bem como a todos que acompanharam minha trajetória e a Deus por me dar forças de sempre continuar nessa luta e trabalho no meio acadêmico.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. W. de et al. Plantas de cobertura e adubação nitrogenada na produção de milho em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 7, p. 721-726, 2013.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

BERTIN, E. G.; ANDRIOLI, I.; CENTURION, J. F. Plantas de cobertura em pré-safra ao milho em plantio direto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 27, n. 3, p. 379-386, 2005.

BLANCO-CANQUI, H. et al. Cover crops and soil health in rainfed and irrigated corn: What did we learn after 8 years? **Soil Science Society of America Journal**, 2023.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Org.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 375-470.

CATI. **O cultivo do milho:** comissão técnica do milho e sorgo. Campinas: CATI, 1997. (Boletim Técnico, 240).

CIAMPITTI, I. A.; ELMORE, R. W.; LAUER, J. Fases de desenvolvimento da cultura do milho. Manhattan: Kansas State University Agricultural **Experiment Station and Cooperative Extension Service**, 2016.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileiro – grãos: 5° Levantamento, fevereiro 2022**. Brasília: CONAB, 2022. Disponível em: https://www.conab.gov.br. Acesso em: 8 set. 2025.

CROCHEMORE, M. L.; PIZA, S. M. T. Germinação e sanidade de sementes de nabo forrageiro conservadas em diferentes embalagens. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, p. 677-680, 1994.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Cover crops affect nitrogen cycling and soil health indicators in tropical no-till systems. **Soil & Tillage Research**, 2023.

CRUZ, J. C. et al. *Manejo da cultura do milho*. Sete Lagoas: **Embrapa Milho e Sorgo**, 2006. (Circular Técnica, INFOTECA-E).

DE GODOY, J. C. S. et al. Produtividade de milho em resposta a doses de nitrogênio com e sem inoculação das sementes com *Azospirillum brasilense.* **Revista Campo Digital**, v. 6, n. 1, 2011.

DE SOUZA, L. C. F. et al. Culturas antecessoras e adubação nitrogenada na produtividade de milho em plantio direto irrigado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 2, n. 3, 2003.

EMBRAPA – "EVOLUÇÃO DO SPD NO BRASIL", E MG.GOV "SISTEMA DE PLANTIO DIRETO COMPLETA 50 ANOS NO BRASIL", 2022

EMBRAPA TRIGO. **AVEIA-PRETA**: ALTERNATIVAS DE USO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO. 2011. Disponível em: https://www.embrapa.br. Acesso em: [data de acesso].

GARCIA, R. A. et al. Desempenho do azevém em sistemas integrados de produção agropecuária. **Revista Agropecuária Técnica**, 2021.

GIACOMINI, S. J. et al. Consorciação de plantas de cobertura antecedendo o milho em plantio direto: II – Nitrogênio acumulado pelo milho e produtividade de grãos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 4, p. 751-762, 2004.

GIACOMINI, S. J. et al. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 325-334, 2003.

GOES, R. J. et al. Nitrogênio em cobertura para o milho em sistema plantio direto na safrinha. ***Revista Brasileira de Milho e Sorgo***, v. 11, n. 2, p. 169-177, 2012.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. *Fisiologia da produção de milho*. Sete Lagoas**: Embrapa Milho e Sorgo**, 2006. (Circular Técnica, INFOTECA-E).

OHLAND, R. A. A. et al. Culturas de cobertura do solo e adubação nitrogenada no milho em plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 3, p. 538-544, 2005.

PIONEER SEMENTES. **Fenologia do milho**. 2018. Disponível em: https://www.pioneersementes.com.br/blog/Documents/FenologiaDoMilho.pdf. Acesso em: [data de acesso].

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013.

SANTOS, H. P.; REIS, E. M. **Rotação de culturas em plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001. 212 p.

SANTOS, P. A. et al. Adubos verdes e adubação nitrogenada em cobertura no cultivo do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 9, n. 2, p. 123-134, 2010.

SBCS – SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Núcleo Regional Sul. RS/SC, 2016.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, v. 30, n. 3, p. 507-512, 1974.

SICHOCKI, D. et al. Resposta do milho safrinha à doses de nitrogênio e de fósforo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 13, n. 1, p. 48-58, 2014.

TORMEN, B. et al. Desempenho do milho cultivado sobre diferentes plantas de cobertura e doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, 2016.

VALDERRAMA, M. et al. Adubação nitrogenada na cultura do milho com ureia revestida por diferentes fontes de polímeros. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 2, p. 659-669, 2014.

WUTKE, E. B.; CALEGARI, A.; WILDNER, L. do P. Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para seu uso. In: LIMA FILHO, O. F. de; AMBROSANO, E. J.; ROSSI, F. (Org.). **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil**: fundamentos e práticas. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 59-168.

ZIECH, A. R. D. et al. Produtividade e componentes de rendimento de milho em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 15, n. 2, p. 195-201, 2016.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 36

AVALIAÇÃO DOS TEORES DE MATÉRIA ORGÂNICA NOS SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL

Evaluation of organic matter content in soils of Rio Grande do Sul

Emanueli Ludwig Michelin[1]; Rafael Sobroza Becker[2]; Natalia Lopes[3]; Jaime Miguel Weber[4]; Priscila Pacheco Mariani[5]; Maicon William Holzschuh[6]

[1] Acadêmica do Curso de Agronomia - UNISC, emanuelimichelin@mx2.unisc.br
[2] Eng. Agrônomo, prof. Dr. do Curso de Agronomia - UNISC, rafaelsob@unisc.com.br
[3] Acadêmica do Curso de Agronomia - UNISC, natalialopes@mx2.unisc.br
[4] Eng. Agrônomo, prof. Dr. do Curso de Agronomia - UNISC, jaimeweber@unisc.br
[5] Eng. Ambiental, profa. Dra. do Curso de Agronomia - UNISC, priscilamariani@unisc.br
[6] Acadêmico do Curso de Engenharia Agrícola - UNISC, maiconholzschuh@unisc.br

RESUMO

A matéria orgânica é um componente essencial à produtividade, pois participa de diversos processos físicos, químicos e biológicos no solo, auxiliando na disponibilidade de nutrientes para as plantas e na melhoria de atributos físicos do solo. Este estudo tem como objetivo analisar os teores de matéria orgânica nos solos do Rio Grande do Sul. A metodologia utilizada contemplou a disponibilização de análises de solo pelo laboratório da Central Analítica UNISC. Foram consideradas 71.731 análises, de diferentes municípios do RS, no ano de 2024. Os dados foram identificados em 8 regiões intermediárias do estado, e os teores de MO classificados por faixas: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto. Os resultados foram demonstrados em gráficos de colunas, por região intermediária e faixas de classificação. Portanto, conclui-se que, a região intermediária de Pelotas apresenta as menores faixas de classificação, enquanto, a região Caxias do Sul apresenta as maiores faixas, o restante das regiões varia de médio para muito baixo e médio para muito alto.
Palavras-chave: Matéria orgânica. Fertilidade. Indicadores de qualidade.

ABSTRACT

Organic matter is an essential component of soil productivity, as it takes part in various physical, chemical, and biological processes, contributing to nutrient availability for plants and improving soil physical attributes. This study aimed to analyze organic matter levels in the soils of Rio Grande do Sul, Brazil. The methodology included soil analyses provided by the Central Analítica UNISC laboratory. A total of 71,731 analyses from different municipalities of the state were considered in 2024. The data were organized into eight intermediate regions, and organic matter contents were classified into ranges: very low, low, medium, high, and very high. The results were presented in column charts by intermediate region and classification ranges. The study concluded that the intermediate region of Pelotas showed the lowest classification ranges, whereas the Caxias do Sul region presented the highest ones. The remaining regions ranged from medium to very low and from medium to very high.
Keywords: Organic matter. Fertility. Quality indicators.

1 INTRODUÇÃO

O estado do Rio Grande do Sul é caracterizado por possuir uma produção agropecuária expressiva, integrando cultivos de grãos, frutíferas, olerícolas e pecuária. A extensão territorial do estado, atrelada à pluralidade de clima e solo, são fatores que

contribuem para a diversidade de cultivos e produções. Contudo, a vasta utilização dos solos para diferentes finalidades, exige que os produtores rurais realizem um manejo adequado, visando o fornecimento dos insumos necessários para contemplar as exigências nutricionais das plantas, bem como, beneficiar as propriedades químicas, físicas e biológicas.

Considerando esse aspecto, os autores Moreira e Siqueira (2006), afirmam que a matéria orgânica é um componente crítico à produtividade, ou seja, quanto mais teores de matéria orgânica do solo (MOS), mais produtivo ele será. Ademais, a sua essencialidade relaciona-se com os diversos processos e interações que ocorrem no âmbito físico, biológico e químico, resultantes da formação, presença e permanência da matéria orgânica na composição do solo.

A matéria orgânica possui uma composição complexa, constituída de resíduos vegetais e animais, em qualquer grau de decomposição, tendo o carbono orgânico como principal elemento resultante destes processos e interações (ROSCOE; MACHADO, 2002). A presença de MOS é fundamental para a vida do solo e produtividade dos cultivos, contribuindo para a infiltração e retenção da água, a partir da dinâmica da atividade biológica. Nesse contexto, o C e outros elementos (H, O, N, P e S) presentes na MOS, conferem a ela, características favoráveis a fertilidade do solo, visto que influencia em diversos processos bio-físico-químicos, tamponando a acidez do solo, interagindo com a retenção de cátions e servindo como alimento nutritivo para microrganismos benéficos presentes no solo (SILVA *et al.*, 2023).

Ademais, o conceito de fertilidade do solo interage com diversos fatores, sendo necessário haver em sua composição, atributos físicos, químicos e biológicos equilibrados e sob uma condição ideal. Entretanto, os termos fertilidade e produtividade não são sinônimos, visto que, para alcançar a produtividade de um solo, os teores de nutrientes precisam estar na forma assimilável para a planta, bem como, em condições físicas favoráveis, como a compactação, sendo assim, o solo pode ser fértil, mas não produtivo (MENDES, 2007).

Desta maneira, a dinâmica da MOS permite que os atributos intrínsecos à produtividade sejam alcançados, a partir dos teores presentes na composição do solo. Contudo, à medida que a MOS é incorporada, a quantidade de C aumenta, e este fator eleva a CTC (Capacidade de Troca de Cátions) e proporciona maior disponibilidade de nutrientes para as plantas, devido às trocas de cargas elétricas nos coloides orgânicos, além disso, atua na estruturação e formação de agregados, propiciando melhor aeração, infiltração e retenção da água (CHIODINI *et al*,. 2013). Contudo, a presença e a preservação de adequados teores de MOS favorecem o acúmulo de carbono orgânico no solo, reduzindo sua decomposição e consequentemente, a liberação de CO_2 para a atmosfera, atuando como um importante mecanismo de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (SILVA e MACHADO, 2000).

Diante do exposto, há uma necessidade em avaliar e sobretudo, identificar os percentuais de matéria orgânica nos solos do estado do Rio Grande do Sul, devido à grande utilização agrícola e sua relação direta com a produtividade. Portanto, este trabalho tem por objetivo analisar os teores de MOS em diferentes regiões geográficas intermediárias no estado Rio Grande do Sul.

ISBN 978-65-990392-6-3

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ORIGEM DOS DADOS

Os percentuais de matéria orgânica utilizados neste estudo foram disponibilizados pela Central Analítica (Figura 1) da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC) em conjunto com o curso de Agronomia da Universidade. A instituição possui 35 anos de atuação e conta com dois laboratórios, o primeiro localizado no campus sede da Universidade de Santa Cruz do Sul (RS) e o segundo na cidade de Primavera do Leste (MT). O foco do trabalho são análises de solo, água, fertilizantes, tecidos vegetais e efluentes, somando cerca de 30 milhões de análises durante o período de atuação. Além disso, encontra-se registrada em diversos órgãos estaduais e federais, responsáveis pela regulamentação e fiscalização das atividades relacionadas ao setor, bem como, possui credenciamento junto ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

Figura 1 - Laboratório da Central Analítica na Universidade de Santa Cruz do Sul (RS).



Fonte: Central Analítica (2025).

Assim, as informações requeridas para a análise dos teores de matéria orgânica que contemplam este estudo, foram extraídas a partir da base de dados com o histórico do ano de 2024 do acervo virtual da Central Analítica. Dessa maneira, os dados foram recebidos através de planilhas, elaboradas pelo *software* Microsoft Excel.

2.2 METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DA MO

As análises de solo consideradas para construção deste estudo foram coletadas a uma profundidade de 0 a 20 cm da superfície, oriundas de diferentes municípios e cultivos do estado do Rio Grande do Sul. Contudo, o método e as condições de coleta de cada amostra são desconhecidos, visto que, este estudo considera apenas os resultados das análises. Sendo assim, os dados de matéria orgânica referem-se às análises de solo realizadas durante o ano de 2024.

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque (RS) · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

Diante desse cenário, as amostras recebidas na unidade do laboratório localizado na Universidade de Santa Cruz do Sul, passam por um processo de cadastro e posteriormente, são encaminhadas para os setores de secagem e moagem. Essas etapas objetivam o preparo da amostra para submissão às metodologias de obtenção dos parâmetros quantitativos e qualitativos de interesse.

Nesse sentido, a metodologia adotada pela Central Analítica, para determinação dos teores de MOS fundamenta-se na oxidação por solução sulfocrômica, partindo da premissa da utilização de dicromato de sódio ($Na_2Cr_2O_7$) e ácido sulfúrico (H_2SO_4), que reagem com a solução do solo a fim de oxidar o carbono presente na composição da matéria orgânica e assim determinar seus teores (TEDESCO, 1995). Além disso, os resultados dos teores de MOS são obtidos pela leitura colorimétrica do espectro de cores da amostra do solo, através do equipamento FZ 120, da fornecedora Fooze (Figura 2). A leitura do percentual varia conforme a intensidade colorimétrica da amostra: cores mais claras correspondem a valores percentuais menores, enquanto cores mais escuras indicam percentuais maiores.

Figura 2 - Equipamento FZ 120 realizando a leitura colorimétrica.



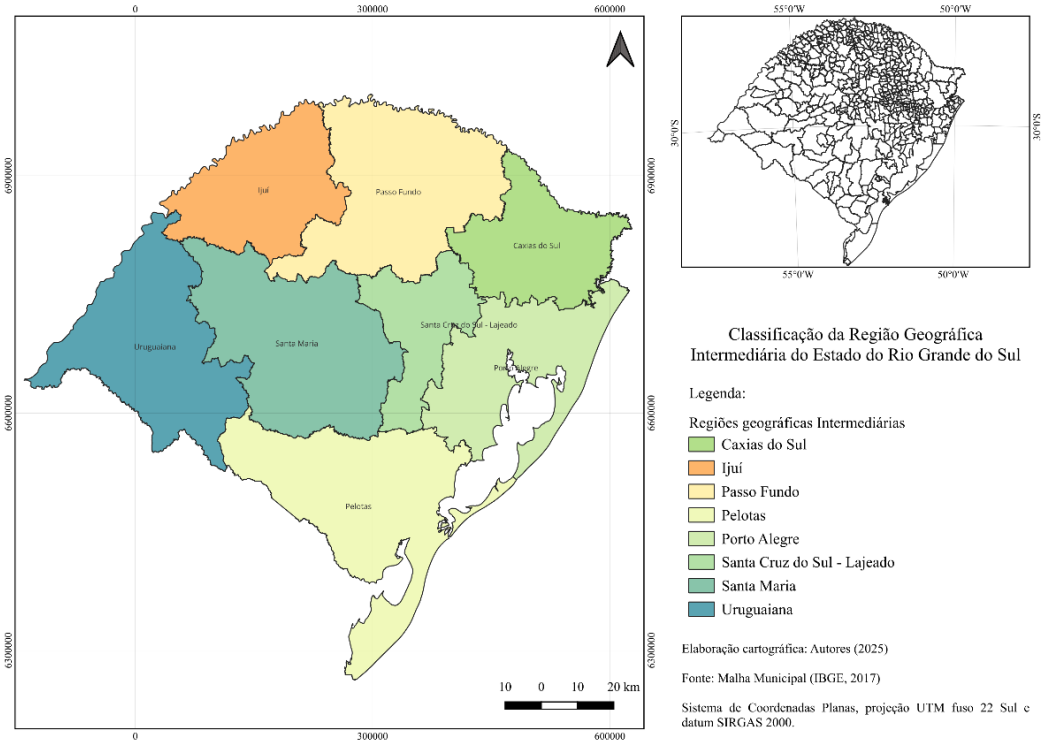
Fonte: Autores (2025)

2.3 DADOS E TRATAMENTOS

A elaboração dos indicativos de MOS presentes neste estudo foi construída a partir de 71.731 resultados de análises de solo, considerando valores percentuais de matéria orgânica por município de origem da amostra. Nesse sentido, os municípios foram classificados em 8 regiões geográficas intermediárias do estado, seguindo a categorização realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2017 e está representada pela Figura 3.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 3 - Mapa das regiões intermediárias do Rio Grande do Sul.



Fonte: Autores (2025)

Ademais, cada mesorregião teve a estratificação dos teores de matéria orgânica por meio de faixas de classes (CQFS, 2016). A tabela 1 apresenta as faixas de classificação dos percentuais de matéria orgânica.

Tabela 1 - Faixas de classificação dos percentuais de matéria orgânica.

Faixa (%)	Classificação
0,0 - 1,5	Muito baixa
1,6 - 2,5	Baixa
2,6 - 3,5	Média
3,6 - 5,0	Alta
> 5,1	Muito alta

Fonte: Autores (2025)

As classificações dos teores de matéria orgânica em faixas, propiciaram o embasamento para elaboração de gráficos apresentados neste estudo, bem como, a fragmentação dos resultados em função da mesorregião de origem.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

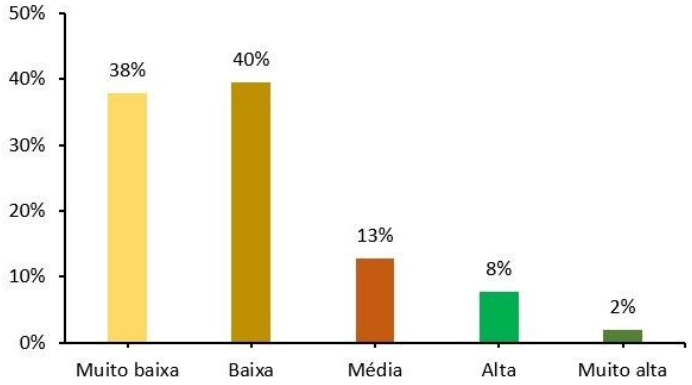
Os resultados referentes à distribuição dos teores de MOS nos solos do Rio Grande do Sul, classificados como muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, estão apresentados através de gráficos, no formato de colunas. Contudo, cada região geográfica intermediária do Rio Grande do Sul está representada individualmente, a

ISBN 978-65-990392-6-3

fim de demonstrar as diferenças regionais nas faixas de classificação. Dessa forma, a disposição dos dados possibilita estratificar as análises, considerando características de cultivos e solos de cada região.

A região geográfica intermediária Pelotas apresentou as faixas muito baixa e baixa em grande parte das amostras, englobando cerca de 78%. Já, de média para muito alta, abrange somente 23%, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Teores percentuais de Matéria Orgânica do Solo para a região geográfica intermediária Pelotas.



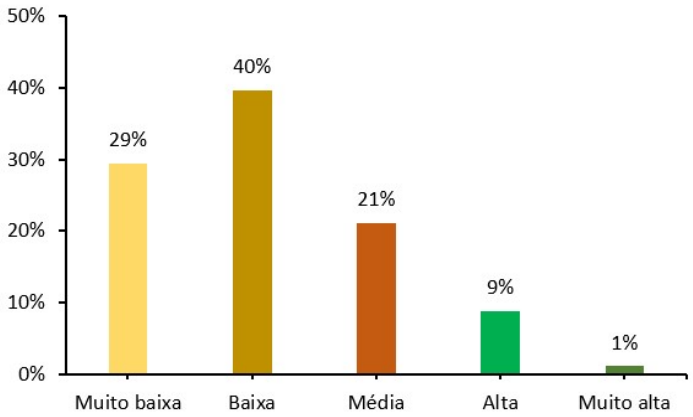
Fonte: Autores (2025)

A região é caracterizada pelo uso do solo para o cultivo do arroz irrigado, nas áreas conhecidas como “Terras Baixas” (PARFITT *et al*,. 2020). A produção da cultura do arroz irrigado envolve manejos que revolvem o solo, com a finalidade de prepará-lo para receber o volume de água necessário para desenvolvimento da cultura. Contudo, o período de alagamento propicia a saturação do solo e a restrição do oxigênio, este fator diferencia e limita a dinâmica de nutrientes e do carbono no solo (MARCHESAN, SILVA e PAULETTO, 2019). Sob esse viés, pressupõe-se que os resultados obtidos com teores de MOS na região correspondem à influência do manejo característico da cultura do arroz irrigado.

Já, a região Santa Cruz - Lajeado contempla cerca de 69% das amostras classificadas nas faixas baixa e muito baixa, e apenas 31% com percentuais nas faixas média, alta e muito alta, a partir do exposto na Figura 5.

Dessa maneira, a região é caracterizada pelo uso intensivo do solo, voltado à produção da cultura do tabaco. O método de condução do cultivo é realizado essencialmente através do manejo convencional, integrando práticas que revolvem e desestabilizam os agregados do solo durante o preparo dos camalhões (ANTONELI e THOMAZ, 2014).

Figura 5 – Teores percentuais de Matéria Orgânica do Solo para a região geográfica intermediária Santa Cruz do Sul - Lajeado.

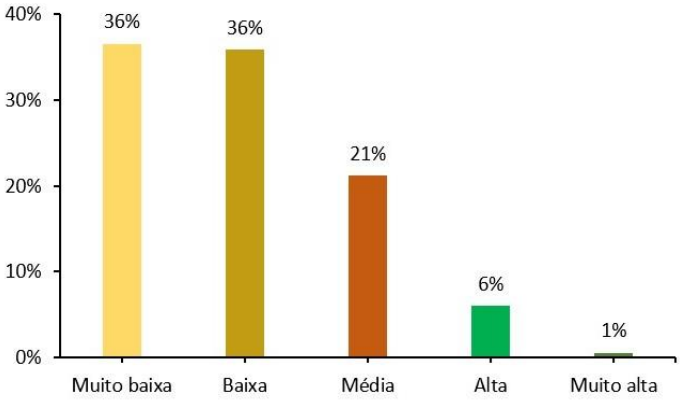


Fonte: Autores (2025)

Diante do exposto, a utilização intensiva do solo atrelada a práticas que constantemente revolvem e desestruturam os agregados do solo, podem aumentar a probabilidade de ocorrência de erosão e perda de MOS. Em consequência deste manejo, a matéria orgânica não fica retida e protegida nos microagregados estabilizadores, sendo exposta ao ataque de microrganismos decompositores que a degradam e diminuem sua concentração e permanência no solo (PILLON, MIELNICZUK e NETO, 2002).

Por outro lado, conforme exemplificado na Figura 6, a região Porto Alegre apresenta a maioria dos percentuais de amostras (72%), classificadas nas faixas muito baixa e baixa. Já as faixas média, alta e muito alta integram somente 28%.

Figura 6 – Teores percentuais de Matéria Orgânica do Solo para a região geográfica intermediária Porto Alegre.



Fonte: Autores (2025)

A região intermediária Porto Alegre engloba municípios com produções agrícolas distintas. Ademais, cabe salientar que alguns municípios estão localizados em regiões peninsulares, com solos predominantemente formados a partir de deposições areníticas salinas, advindas do oceano. Contudo, um solo arenoso possui baixa fertilidade natural além disso, a salinidade que integra a construção das

ISBN 978-65-990392-6-3

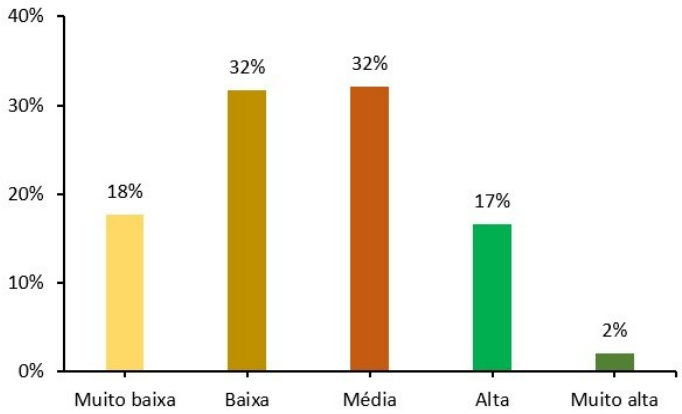
deposições interfere na dinâmica de absorção dos nutrientes pelas raízes, devido à influência dos íons de sódio ou cloreto presentes no solo (FAROOQ *et al*., 2015).

Além do mais, há diferentes tipos de solo na região, alguns destes classificados como Argissolos, Organossolos, Planossolos e Neossolos (STRECK, 2018). Contudo, os Argissolos possuem como característica a baixa saturação por bases, enquanto que, os Planossolos são hidromórficos em áreas baixas de várzea, além disso, os Neossolos apresentam uma menor evolução, sendo constituídos de materiais minerais orgânicos, semelhante aos Organossolos, formados por material orgânico em diferentes graus de decomposição (SANTOS *et al*., 2025).

Portanto, os resultados obtidos demonstram um ponto de atenção ao manejo utilizado nas áreas e municípios, considerando os diferentes tipos de solos característicos na região, atrelados às suas particularidades e desafios.

Por conseguinte, a região Santa Maria indica que 50% dos teores estão nas faixas muito baixa e baixa, enquanto, os outros 50% representam as faixas média, alta e muito alta, podendo ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 – Teores percentuais de Matéria Orgânica do Solo para a região geográfica intermediária Santa Maria.



Fonte: Autores (2025)

A composição agrícola formada pelos municípios integrantes desta região é diversificada, porém, destaca-se na produção de arroz irrigado e soja. Os solos predominantes na região são classificados como Argissolos e Planossolos, sendo em sua maioria medianamente profundos (REINERT *et al*., 2007). No entanto, as duas classificações possuem diferenças no quesito fertilidade, e consequentemente acúmulo de MOS. Os Argissolos em sua maioria, apresentam fertilidade natural e saturação por base relativamente baixa, já os Planossolos tendem a apresentar teores mais elevados de fertilidade natural e saturação por bases (SANTOS *et al*., 2025).

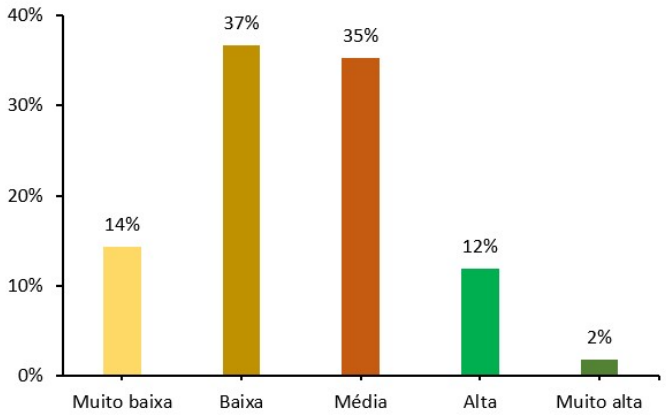
O acúmulo de MOS influencia na dinâmica dos nutrientes, e em condições físicas e biológicas. Os resultados podem estar relacionados com o tipo de solo característico dos municípios amostrais. Além disso, observa-se que as faixas apresentaram proporções de 50%, entre teores baixos e favoráveis de MOS, assim como, a apresentação das classificações de solo predominantes na região e aspectos específicos relacionados às características produtivas de ambos.

ISBN 978-65-990392-6-3

Cerca de 51% das amostras que compõem a região intermediária Uruguaiana indicam teores menores de matéria orgânica, enquanto 49% indicam teores favoráveis, conforme exposto na Figura 8.

A região possui expressiva produção da cultura do arroz irrigado, composta de alguns dos municípios com maior a produtividade do estado, no ano de 2023/2024, conforme dados da Radiografia da Agropecuária Gaúcha (2024). Além disso, também integra a produção pecuária e vitivinícola.

Figura 8 - Teores percentuais de Matéria Orgânica do Solo para a região geográfica intermediária Uruguaiana.



Fonte: Autores (2025).

Segundo Marchesan *et al.*, (2019) os solos de terras baixas que cultivam arroz, geralmente apresentam baixos teores de MOS. Este fator é caracterizado pelas diferentes dinâmicas que ocorrem no solo, principalmente em cultivos irrigados, provenientes da saturação do solo pelo período alagado.

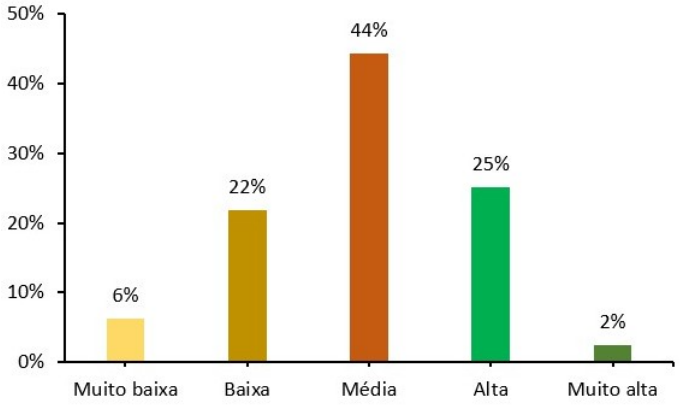
Ademais, no que se refere à produção vitivinícola implementada na região, há utilização de manejos conservacionistas de solo, integrando práticas benéficas atreladas à sustentabilidade e ao aumento de MOS, a partir da utilização de plantas de cobertura (GOULARTE, 2015). Nesse contexto, pode-se comparar os resultados expostos no gráfico, com os diferentes sistemas de produção, bem como suas respectivas características de manejo e fertilidade.

Os percentuais exemplificados na Figura 9, referem-se a região intermediária Passo Fundo e indicam que cerca de 2,1 terços das amostras contemplam faixas favoráveis de MOS. Sendo assim, as menores faixas (baixo e muito baixo) representam 28% do total de amostras.

A região é caracterizada pela produção de grãos (soja, milho, trigo), atrelada às práticas conservacionistas de solo, como a utilização de terraceamento e sistema plantio direto (MOMBELLI, 2015). Tendo em vista as práticas utilizadas nos cultivos da região, pressupõe-se que, os resultados encontrados a partir das faixas de classificação possuem influência pelo manejo que vem sendo consolidado. Nesse sentido, a agricultura conservacionista garante a manutenção dos sistemas agrícolas, sendo eficiente na melhoria da qualidade do solo, preservando, restaurando e recuperando propriedades físicas, biológicas e químicas do solo (DENARDIN *et al.*, 2010).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 9 – Teores percentuais de Matéria Orgânica do Solo para a região geográfica intermediária Passo Fundo.

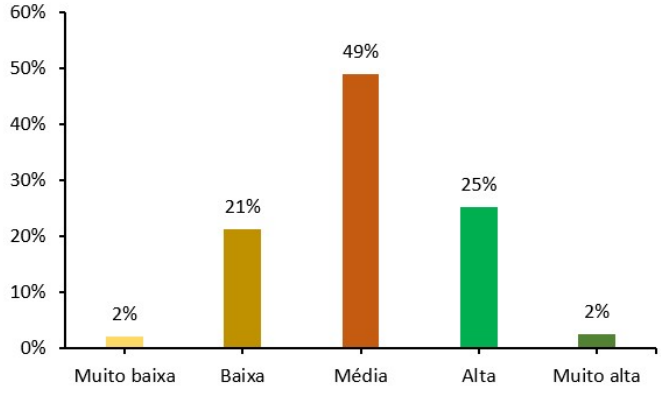


Fonte: Autores (2025)

O sistema plantio direto e/ou o plantio direto da palha auxilia no aporte da formação de MOS, devido a concentração de biomassa nas camadas superficiais do solo que posteriormente são decompostas (CERRI *et al*., 2019). Contudo, o terraceamento contribui com a diminuição do escoamento superficial e erosão, além de auxiliar na retenção das águas da chuva e melhoria na estrutura do solo (MARIA *et al*., 2019). É notório que a construção de práticas cada vez mais alinhadas com a conservação do solo, confere fertilidade, estrutura e produtividade ao sistema.

A análise da região intermediária Ijuí está exposta na Figura 10. Contudo, possui semelhança com a região Passo Fundo, trazendo o maior percentual (76%) nas faixas média, alta e muito alta. O restante dos percentuais está distribuído nas faixas baixa e muito baixa.

Figura 10 – Teores percentuais de Matéria Orgânica do Solo para a região geográfica intermediária Ijuí.



Fonte: Autores (2025)

A análise da região intermediária Ijuí se assemelha com a Passo Fundo, trazendo o maior percentual (76%) nas faixas média, alta e muito alta. O restante dos percentuais está distribuído nas faixas baixa e muito baixa.

ISBN 978-65-990392-6-3

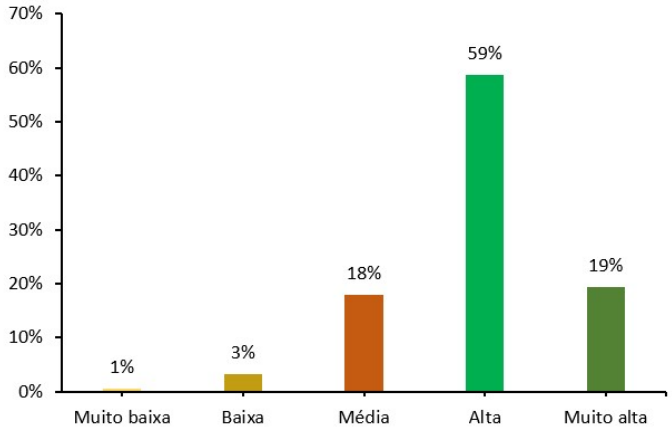
Sob esse contexto, a região é produtora de grãos como a soja, milho e trigo, segundo documento da Radiografia da Agropecuária Gaúcha (2024). Além disso, conta com a adoção de tecnologias na produção, como o sistema de plantio direto consolidado e agricultura de precisão a taxa variável, principalmente para o cultivo da soja (ANTONINI *et al*., 2018).

As técnicas que embarcam o conceito de agricultura de precisão, conferem ao sistema uma melhor sistematização e conhecimento detalhado da situação do solo, bem como, a implementação de práticas específicas de manejo, conforme necessidade. Diante desse cenário, as amostras de solo seguem um critério de coleta por talhões, com pontos amostrais georreferenciados, a fim de elaborar mapas de produtividade e de diagnóstico da área (SANTI *et al*., 2016).

Portanto, compreender as necessidades nutricionais do solo é fundamental para a adoção de manejos adequados, visando a reposição e conservação de nutrientes essenciais, especialmente a matéria orgânica.

Contudo, a última análise realizada integra a região intermediária Caxias do Sul e está apresentada na Figura 11. É possível observar a maioria das amostras classificadas em teores altos e muito altos (78%), por conseguinte, 18% representam a faixa média, e apenas 4% classificadas como baixa e muito baixa. Caracterizando a região como a que possui maiores teores de MOS.

Figura 11 – Teores percentuais de Matéria Orgânica do Solo para a região geográfica intermediária Caxias do Sul.



Fonte: Autores (2025)

Nessa perspectiva, o cultivo vitivinícola possui alta expressão na região, além disso, também há produção de outras frutíferas, como a maçã. Sob esse viés, os autores Melo e Zalamena (2016) expõem que a região possui solos naturalmente férteis e ácidos, com teor MOS variando de médio a alto, este fato corrobora com os resultados expostos neste estudo.

Além disso, o tipo de solo predominante na região e o alto índice de precipitação de chuvas e temperatura amenas, favorecem a acumulação de MOS (STRECK *et al*., 2018). Portanto, entende-se que há uma tendência natural atrelada aos índices de MOS encontrados na região, alinhada com as tecnologias e manejos que vêm sendo aplicados às produções, como a utilização de plantio direto na palha.

ISBN 978-65-990392-6-3

4 CONCLUSÃO

Diante dos resultados apresentados neste estudo, percebe-se significativa semelhança dos teores de MOS nas faixas muito baixa e baixa, encontrados nas regiões de Pelotas, Santa Cruz do Sul - Lajeado e Porto Alegre. Dentre essas, a região de Pelotas possui os menores teores de MOS, em comparação com o restante das regiões.

Ademais, percebe-se que há similaridade entre as regiões de Ijuí e Passo Fundo, no que se refere às faixas média e alta. Por outro lado, Santa Maria e Uruguaiana possuem proximidade nos resultados encontrados entre as faixas média e baixa. Sendo assim, a região que expressa maior diferencial entre as demais, refere-se a Caxias do Sul, apresentando os maiores resultados de MOS.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Central Analítica - UNISC pela disponibilização dos dados para elaboração deste trabalho e ao Curso de Agronomia da Universidade de Santa Cruz do Sul pelo suporte.

REFERÊNCIAS

ANTONELI, Valdemir; THOMAZ, Edivaldo Lopes. Perda de solo em cultivo de tabaco sob diferentes formas de cultivo na região do Sudeste do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia,** São Paulo, v. 15, n. 3, p.455-469, 2014. Disponível em:https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/534/405. Acesso em: 04 set. 2025.

ANTONINI, Rafael Cippolat et al. Adoção e Uso da Agricultura de Precisão na Região das Missões do Rio Grande do Sul. **HOLOS**, [S. l.], v. 4, p. 106–121, 2018. DOI: 10.15628/holos.2018.6297. Disponível em: https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/6297. Acesso em: 07 set. 2025.

CERRI, Carlos Eduardo Pellegrino et al. Inter-relação entre a Agricultura Conservacionista e a Mitigação das Emissões dos Gases de Efeito Estufa. In: BERTOL, Ildegardis; MARIA, Isabela Clerici de; SOUZA, Luciano da Silva (Eds). **Manejo e Conservação do Solo e da Água**. Viçosa, MG. 2019. 51 - 82 p. ISBN 978-85-86504-25-9.

CHIODINI, Bruna Muller *et al*. **Matéria orgânica e a sua influência na nutrição de plantas.** Trabalho Acadêmico (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal do Piauí - UFPI, Bom Jesus, 2013. Disponível em: https://www.fag.edu.br/upload/revista/cultivando_o_saber/517e8d44b5ff6.pdf. Acesso em: 09 ago. 2025.

DENARDIN, José Eloir *et al.* Agricultura Conservacionista no Brasil uma Análise do Conceito à Adoção**.** In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água. 18., Teresina. Novos caminhos para a agricultura conservacionista no Brasil. **Anais ...**. Teresina: Embrapa Meio Norte: Universidade Federal do Piauí, 2010.

FAROOQ, Muhammad et al. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review. **Agron.Sustain.Dev**, France, v. 35, p. 462, fev. 2015. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-015-0287-0#Sec1**.** Acesso em: 09 set. 2025.

GOULARTE, Rodinaldo Severo. **Práticas Ambientais Sustentáveis das Vinícolas da Região da Campanha Gaúcha.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Enologia) - Universidade Federal do Pampa, Dom Pedrito, 2015.

JOÃO, Paulo Lipp *et al.* **Radiografia da Agropecuária Gaúcha.** *[S. l.]*: Departamento de Governança de Sistemas Produtivos, 2024. *E-book*.

MARCHESAN, Enio *et al*. Manejo do Solo em Ambiente de Terras Baixas: A Experiência Da Região Sul. *In*: BERTOL, Ildegardis; MARIA, Isabela Clerici de; SOUZA, Luciano da Silva (Eds). **Manejo e Conservação do Solo e da Água**. Viçosa, MG: SBCS, 2019. 729 - 768 p.

MARIA, Isabela Clerici de; BERTOL, Ildegardis; DRUGOWICH, Mario Ivo. Práticas Conservacionistas do Solo e da Água. *In*: BERTOL, Ildegardis; MARIA, Isabela Clerici de; SOUZA, Luciano da Silva (Eds). **Manejo e Conservação do Solo e da Água**. Viçosa, MG: SBCS, 2019. p 527 - 584.

MELO, George Wellington; ZALAMENA, Jovani. **Retrato da Fertilidade de Solos Cultivados com Videira nas Regiões da Serra e Campanha Gaúcha.** Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2016.

MENDES, Alessandra Monteiro Salviano. **Introdução à fertilidade do solo: Aula ministrada no Curso de Manejo e Conservação do Solo e da Água promovido pela superintendência Federal de Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Estado da Bahia – SFA -BA/SDC/MAPA.** Bahia: Embrapa Semiárido, 2007.

MOMBELLI, Julia Soares. **Agricultura Conservacionista na Produção de Grãos no Planalto do Rio Grande do Sul.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MOREIRA, Fátima M. S.; SIQUEIRA, José Oswaldo. **Microbiologia e Bioquímica do Solo.** 2. ed. atual. e ampl. Lavras: Editora UFLA, 2006. *E-book*. Disponível em: https://www.esalq.usp.br/departamentos/lso/arquivos_aula/LSO_400%20Livro%20-%20Microbiologia%20e%20bioquimica%20do%20solo.pdf. Acesso em: 09 ago. 2025.

PARFITT, José Maria Barbat *et al*. **Modelos para Sistematização nas Terras Baixas do Rio Grande do Sul.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2020. 22 p

PILLON, Clenio Nailto; MIELNICZUK, João; NETO, Ladislau Martin. **Dinâmica da Matéria Orgânica no Ambiente.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2002. 41 p. ISSN 1516-8840.

REINERT, Dalvan José *et al*. **Principais Solos da Depressão Central e Campanha do Rio Grande do Sul.** 2. ed. Santa Maria : Departamento de Solos - UFSM, 2007. 47 p. Disponível em: https://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.quoos.com.br/downloads/Disciplinas/FundCiSolo/Guia_excursao_fundamentos_3edv3.pdf. Acesso em: 06 set. 2025.

ROSCOE, Renato; MACHADO, Pedro Luiz Oliveira de Almeida. **Fracionamento Físico do Solo em Estudos da Matéria Orgânica.** Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 86 p. ISBN 85-7540-004-5.

SANTI, Antônio Luis *et al.* **Agricultura de Precisão no Rio Grande do Sul.** 1. ed. Santa Maria: Editora CESPOL, 2016. 309 p. *E-book*.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos, *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 6. ed., rev. e ampl. - Brasília, DF: Embrapa, 2025. 393 p. ISBN 978-65-5467-104-0.

SILVA, Carlos Alberto; MACHADO, Pedro Luiz Oliveira de Almeida. **Sequestro e Emissão de Carbono em Ecossistemas Agrícolas**: estratégias para o aumento dos estoques de matéria orgânica em solos tropicais. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2000. p. 23. ISSN 1517-2627. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/336828. Acesso em: 18 set. 2025

SILVA, Carlos Alberto *et al*. Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções. *In:* BETTOIL, Wagner *et al*. **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. p. 17-47. ISBN 978-65-89957-66-9.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO - NÚCLEO REGIONAL SUL. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.** *[S. l.]*: Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2016. Disponível em: https://www.sbcs-nrs.org.br/docs/Manual_de_Calagem_e_Adubacao_para_os_Estados_do_RS_e_de_SC-2016.pdf. Acesso em: 28 ago. 2025.

STRECK, Edemar Valdir *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul.** 3. ed., rev. e ampl. – Porto Alegre, RS: Emater/RS- Ascar, 2018. 252 p.

TEDESCO, José Marino *et al*. **Análises de Solo, Plantas e Outros Materiais**. 2. ed., rev. e ampl - Porto Alegre, RS: Departamento de Solos UFRGS, 1995. 174 p.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 37

RESPOSTAS DE CULTIVARES DE TRIGO A DIFERENTES DOSES DE ADUBAÇÃO NITROGENADA EM COBERTURA

Responses of wheat cultivars to different nitrogen fertilization doses in topdressing

Érika Nunes Macedo[1]; Dienifer Weirich Lopes[1]; João Gabriel Fortes Peixoto[1]; Lorenzo Isasmendi da Silveira[1]; Wellington da Silva[1]; Giovani Zabot[2]; Marcus Vinícius Tres[3]; Alberto Eduardo Knies[4]

[1] Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs), Rua Sete de Setembro, nº. 1040, Centro, CEP 96508-010, Cachoeira do Sul - RS, Brasil, e-mail para contato <erika-macedo@uergs.edu.br>.
[2] Eng. de Alimentos e Dr. em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Maria Campus Cachoeira do Sul - RS, Brasil <giovani.zabot@ufsm.br>.
[3] Eng. de Alimentos, Me. e Dr. em Engenharia de Alimentos. Professor Adjunto da Universidade Federal de Santa Maria Campus Cachoeira do Sul - RS, Brasil <marcus.tres@ufsm.br>.
[4] Eng. Agr., Me. em Ciência do Solo e Dr. em Eng. Agrícola, prof. Adjunto da Uergs Unidade em Cachoeira do Sul - RS, <alberto-knies@uergs.edu.br>.

RESUMO

O trigo é uma das culturas mais importantes da agricultura mundial, sendo sua produção para alimentação humana e animal. O objetivo deste trabalho foi avaliar a resposta de cultivares de trigo submetidas a diferentes doses de adubação nitrogenada em cobertura. Um experimento foi realizado em campo na safra 2024 na Estação Agronômica da Uergs em Cachoeira do Sul-RS, com delineamento experimental inteiramente casualizado com 3 repetições, em esquema bifatorial, sendo o fator A constituído de 18 cultivares comerciais de trigo e, o fator D de 5 doses de adubação nitrogenada em cobertura (0; 50; 100; 150 e 200% da dose recomendada). Foram avaliados as características agronômicas e os principais componentes de rendimento. No presente estudo, observou-se que a resposta das cultivares de trigo à adubação nitrogenada variou conforme o material genético e a dose aplicada, com efeito significativo sobre a altura de plantas, umidade de grãos, peso do hectolitro e produtividade de grãos, destacando-se as cultivares ORS Falcão, BAR20 e ORS Gladiador pelo maior desempenho produtivo.

Palavras-chave: *Triticum aestivum* L.. Nitrogênio. Produtividade.

ABSTRACT

Wheat is one of the most important crops in global agriculture, produced for both human and animal consumption. The objective of this study was to evaluate the response of wheat cultivars to different rates of nitrogen topdressing. A field experiment was conducted in the 2024 harvest at the Uergs Agronomic Station in Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul, using a completely randomized experimental design with three replicates in a two-factor scheme. Factor A consisted of 18 commercial wheat cultivars and Factor D consisted of five rates of nitrogen topdressing (0; 50; 100; 150; and 200% of the recommended rate). Agronomic characteristics and main yield components were evaluated. In the present study, it was observed that the response of wheat cultivars to nitrogen fertilization varied according to the genetic material and the dose applied, with a significant effect on plant height, grain moisture, hectoliter weight and

productivity, highlighting the cultivars ORS Falcão, BAR20 and ORS Gladiador for their greater productive performance.

Keywords: *Triticum aestivum* L., Nitrogen, Productivity.

1 INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum L.*) é uma das culturas mais importantes da agricultura mundial, ocupando papel central na alimentação humana e na geração de renda para produtores. No Brasil, embora seja cultivado em diversas regiões, destaca-se principalmente na Região Sul, devido às condições climáticas mais favoráveis. O Rio Grande do Sul detém o título de maior produtor de trigo do Brasil, assim concentrando uma grande diversidade de cultivares adaptadas às condições de solo e clima do estado. A escolha da variedade correta é um fator determinante para alcançar altas produtividades e garantir qualidade industrial, uma vez que diferentes materiais apresentam características distintas de ciclo, sanidade e rendimento.

Com mais de 80 cultivares recomendadas para o estado do Rio Grande do Sul, destacam-se cultivares modernas, de ciclo precoce e ampla adaptação, oferecendo estabilidade de rendimento, com alto potencial produtivo, boa resistência a doenças e excelente qualidade industrial, sendo recomendadas para diversas regiões do Sul. Além da produção de grãos, algumas cultivares são de duplo propósito, podendo ser utilizadas para produção de forragem no outono e inverno, garantindo ganhos superiores em sistemas de pecuária e agricultura integrados.

Entre os fatores que influenciam diretamente a produtividade do trigo, a adubação nitrogenada exerce papel fundamental. O nitrogênio é o macronutriente mais importante para o desenvolvimento das plantas, participando da sintetização de proteínas, clorofila e atuando diretamente nos processos de crescimento e desenvolvimento das plantas. O nitrogênio (N) está diretamente ligado as bases que dão origem nas moléculas de enzimas, ácidos nucleicos e biomoléculas, além de estar interligado e responsável pela realização da fotossíntese (TREVIZAN, 2017).

A aplicação de nitrogênio deve ser realizada na semeadura e em cobertura, no momento em que a planta estiver com duas folhas e no início do perfilhamento (entre perfilhamento e início do alongamento), pois o período entre a emergência até o alongamento das plantas constitui momentos decisivo para definir o potencial produtivo do trigo (EMBRAPA, 2023). A recomendação da adubação nitrogenada em trigo varia de acordo com o teor de matéria orgânica do solo, cultura antecedente e expectativa de rendimento. Em solos com alto teor de matéria orgânica a cultura pode não necessitar de adubação de nitrogênio (CQFS, 2016).

Sem a utilização de nitrogênio as plantas poderão ter uma coloração mais amarelada. É importante que se tenha uma análise de solo para a recomendação da adubação e otimizar a adubação nitrogenada. Quando se tem excesso de nitrogênio, pode ocorrer o acamamento das plantas, fazendo diminuir o rendimento e a qualidade industrial, ocorrendo também perdas por lixiviação e uma menor eficiência do uso do fertilizante (ZAGONEL et al., 2002).

A aplicação adequada da adubação nitrogenada é determinante para o aumento do número de espigas, grãos por espiga, massa de mil grãos e, consequentemente, para a produtividade. Por isso, compreender como diferentes

ISBN 978-65-990392-6-3

cultivares de trigo respondem a diferentes doses de nitrogênio é essencial para otimizar o manejo da adubação, reduzir custos e aumentar a eficiência produtiva no campo.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho agronômico de 18 cultivares de trigo submetidas a diferentes doses de adubação nitrogenada, aferindo as características como altura de planta, tamanho de espiga, umidade dos grãos, peso do hectolitro (PH) e produtividade de grãos. A partir desses dados, pretende-se identificar cultivares mais responsivas à adubação e com maior potencial produtivo, visando analisar e desenvolver um manejo eficiente da cultura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento a campo foi realizado na safra 2024, no município de Cachoeira do Sul, no Estado do Rio Grande do Sul, na área experimental da Estação Agronômica da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs), situada em latitude 29º 53'11,5'' S, longitude 53º 00'44.2'' W e altitude de 125 m. O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 2018) e o clima da região definido por Köppen como subtropical úmido.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado com parcelas subdivididas, com 3 repetições, em esquema bifatorial, sendo o fator A constituído de 18 cultivares comerciais de trigo (Quadro 1) e o fator B de 5 doses de adubação nitrogenada em cobertura (0; 50; 100; 150 e 200% da dose recomenda).

Quadro 1. Descrição das cultivares de trigo utilizadas no experimento

Nº.	Cultivares	Empresa obtentora	Ciclo
1	ORS Selvagem	OR Sementes	Tardio
2	ORS Gladiador	OR Sementes	Médio/ tardio
3	ORS Falcão	OR Sementes	Superprecoce
4	ORS Feroz	OR Sementes	Precoce
5	ORS Soberano	OR Sementes	Médio
6	ORS Absoluto	OR Sementes	Precoce
7	ORS Turbo	OR Sementes	Superprecoce
8	ORS Premium	OR Sementes	Médio
9	TBIO Talismã	Biotrigo	Precoce
10	TBIO Sentinela	Biotrigo	Tardio
11	TBIO Titan	Biotrigo	Médio
12	TBIO Calibre	Biotrigo	Superprecoce
13	TBIO Trunfo	Biotrigo	Precoce
14	TBIO Motriz	Biotrigo	Médio/ Tardio
15	TBIO Audaz	Biotrigo	Precoce
16	BAR 20	Barenbrug	Precoce
17	BAR 10	Barenbrug	Superprecoce
18	ROSS 90	Sementes ROSS	Precoce

Fonte: Empresas obtentoras (2025).

A semeadura foi realizada no dia 11 de junho de 2024 (figura 1), utilizando uma semeadora de 19 linhas, com espaçamento de 17 cm entre linhas e com uma densidade de semeadura de 51 sementes por metro linear (aproximadamente 130 $Kg.ha^{-1}$ de sementes). Sete dias após a semeadura, foram aplicados 320 $Kg.ha^{-1}$ de fertilizante formulado 04-34-10 de NPK a lanço. Essa recomendação foi realizada com base no Manual de Calagem e Adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (2016) para expectativa de rendimento de 6 $Mg\ ha^{-1}$.

Figura 1 - Etapas da implantação do experimento a campo, sendo a) área de implantação do trigo e, b) Disposição das sementes na semeadora.



Fonte: Autores (2025).

A adubação nitrogenada em cobertura foi realizada em duas aplicações, sendo 50% quando as plantas apresentavam duas a três folhas expandidas e, a segunda no início do perfilhamento. A fonte de nitrogênio utilizada foi a ureia, com 45 % de N, aplicada manualmente a lanço sobre a cultura em desenvolvimento (figura 2).

Figura 2 - Aplicação da adubação nitrogenada em cobertura.



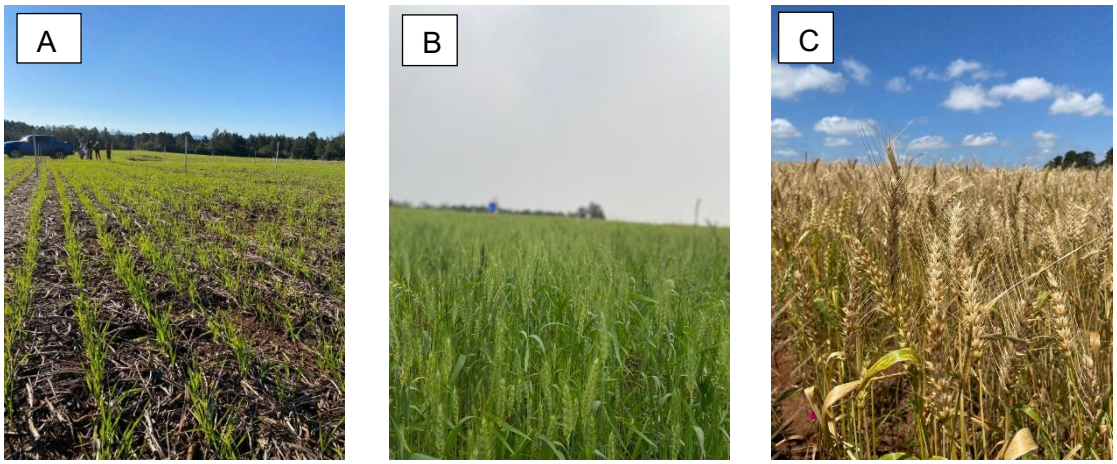
Fonte: Autores (2025).

Foi realizado o monitoramento do desenvolvimento da cultura visando manter a sanidade da mesma (figura 3). Todas as práticas culturais, como o controle de plantas

ISBN 978-65-990392-6-3

espontâneas, pragas e doenças, seguiram as recomendações de Kuhnem et al. (2020). Ao final do ciclo da cultura e no momento de colheita, foram avaliadas características agronômicas: altura das plantas, comprimento da espiga, o peso do hectolitro (PH) e a produtividade de grãos.

Figura 3 - Trigo em diferentes fases de desenvolvimento.

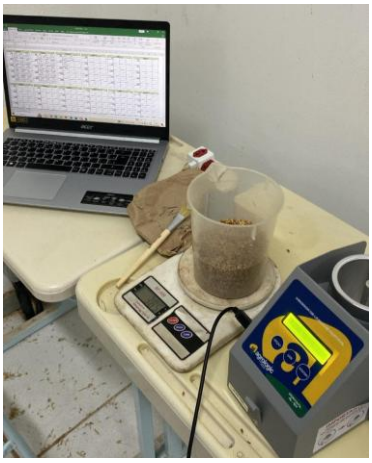


Legenda: A) Trigo em estádio de perfilhamento, B) em estádio de enchimento de grãos e, C) em maturação fisiológica. Fonte: Autores (2025).

A altura das plantas, comprimento da espiga e o número de grãos por espiga foram medidos aleatoriamente em 3 plantas por parcela, sendo a altura das plantas (distância desde o solo até o final da espiga) e o comprimento da espiga medidos com auxílio de uma trena.

Para a avaliação da produtividade de grãos, colheram-se manualmente 1 m² (1,0 m x 1,0 m), escolhidos ao acaso dentro de cada parcela. Foi efetuada a trilha das amostras, retirada das impurezas presentes nos grãos, sendo posteriormente realizada a pesagem em balança eletrônica, determinação da umidade dos grãos e o peso de hectolitrico (PH) em equipamento específico (figura 5) e o peso final foi corrigido para 13% de umidade dos grãos.

Figura 5 - Pesagem das amostras para cálculo da produtividade, medição do PH e umidade dos grãos.



Fonte: Autores (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

Todas as variáveis analisadas obtidas foram submetidas à análise de variância (teste F) e, quando a diferença foi significativa, a análise complementar foi realizada pelo teste de Scott-Knott, ambos ao nível de 5% de probabilidade de erro, com auxílio do software Sisvar.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1 são apresentados os resultados dos indicadores estatísticos do experimento. Conforme pode-se observar, houve efeito de interação entre os fatores cultivares e dose de adubação nitrogenada em cobertura nas variáveis PH e produtividade de grãos. Os fatores cultivares e dose de adubação nitrogenada em cobertura afetaram significativamente todas as variáveis analisadas (alturas das plantas, comprimento das espigas, umidade dos grãos, PH e produtividade de grãos).

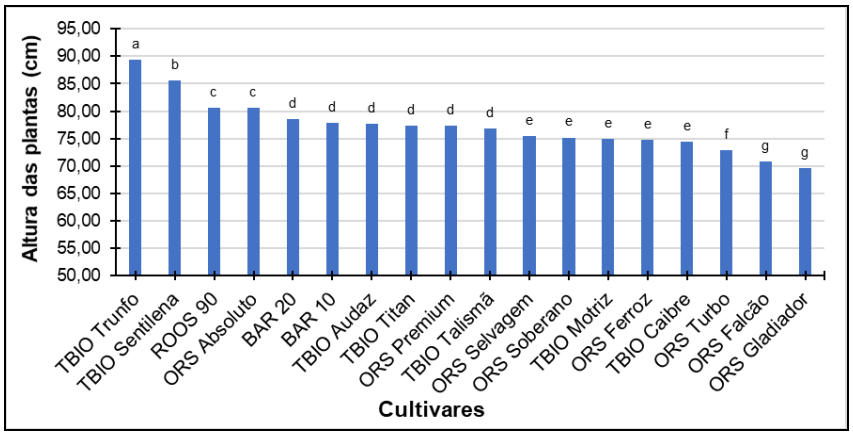
Tabela 1. Resultados da análise estatística (f calculado) para as variáveis resposta avaliadas em função dos fatores analisados no experimento.

Fatores	Alt.	Comp.esp.	Umid.	PH	Prod.
Cultivares	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*
Doses de N	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*
Cult. x doses de N	0,20^{ns}	0,09^{ns}	0,06^{ns}	0,00*	0,00*
CV (%)	3,43	11,13	7,35	0,75	11,60
EP	0,68	0,20	0,32	0,15	1,27

Onde: Cult.: cultivares. Cult. x doses de N.: Análise da interação dos fatores sobre a variável resposta. CV: coeficiente de variação (%). EP: erro padrão. Alt.: altura das plantas; Comp.esp.: comprimento das espigas. Umid.: umidade dos grãos na colheita. PH: peso do hectolitro. Prod.: produtividade de grãos. *Efeito significativo, quando Pr<0,05. ^{ns} Efeito não significativo, quando Pr>0,05. Fonte: Autores (2025).

A altura das plantas variou entre as cultivares analisadas (figura 6), com maior valor para a cultivar TBIO Trunfo seguida pela TBIO Sentinela e, com menor altura as cultivares ORS Falcão e ORS Gladiador.

Figura 6 - Alturas das plantas de trigo em função das diferentes cultivares analisadas.



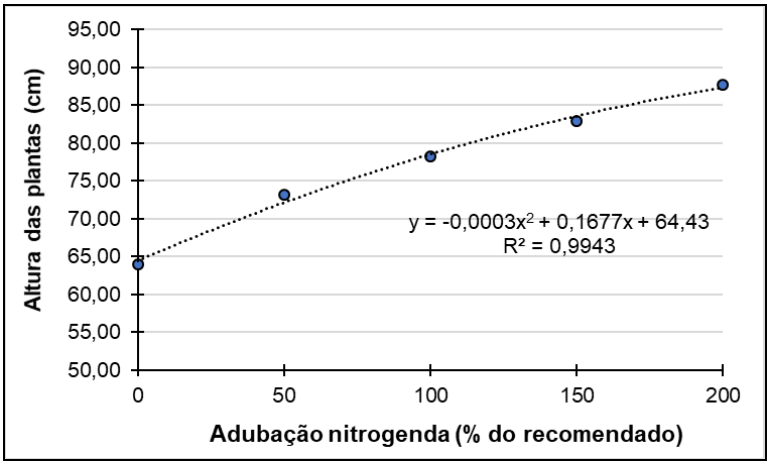
*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott (p<0,05). Fonte: Autores (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

Esse comportamento reflete o controle genético da estatura, já que cultivares modernas podem ser desenvolvidas com porte reduzido para diminuir o acamamento. Trabalhos como o de Ferreira et al. (2019), confirmam que a altura do trigo é altamente dependente do genótipo, sendo comum encontrar cultivares de porte baixo mesmo sob alta disponibilidade de N. Assim, a variação observada no experimento está de acordo com a literatura.

Em relação às doses de N em cobertura, podemos observar um incremento crescente da altura das plantas com o aumento da dose (figura 7), com média de 64,0 cm na dose 0%, chegando a 87,7 cm em 200% da dose recomendada (figura 2).

Figura 7 - Altura das plantas de trigo em função das diferentes doses de adubação nitrogenada em cobertura avaliadas.



Fonte: Autores (2025).

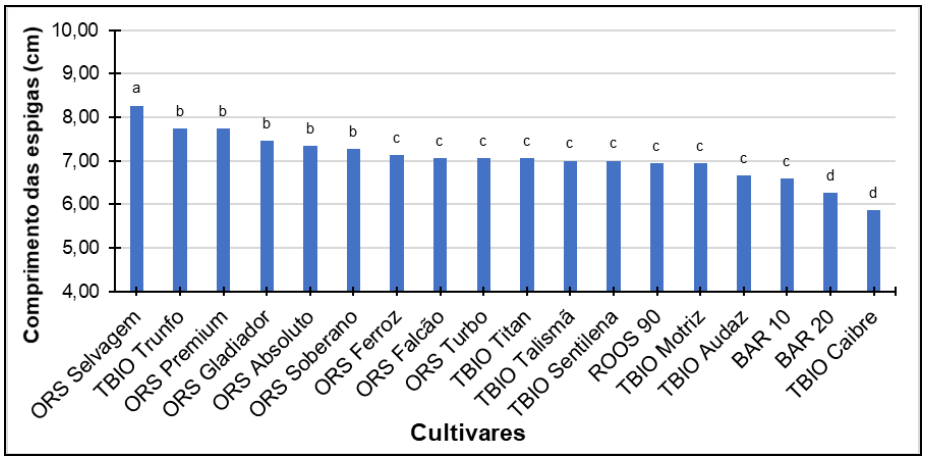
Esse resultado confirma o papel essencial do nitrogênio no crescimento vegetativo, já que participa na síntese de proteínas e clorofila. Resultados semelhantes foram obtidos por Oliveira et al. (2016), que observaram aumento até 120 kg ha^{-1}, e por Cavalcante et al. (2020), que encontraram crescimento até 150 kg ha^{-1}, com tendência de estabilização. Por outro lado, Camponogara et al. (2024) observou que acima de 90 kg ha^{-1} não houve diferença, o que mostra que esse efeito depende da cultivar e do ambiente.

O comprimento de espiga variou significativamente entre as cultivares avaliadas, com destaque para ORS Selvagem, ORS Premium e TBIO Trunfo, que apresentaram maiores valores (figura 8). Esse resultado evidencia o papel do fator genético na determinação desse componente de rendimento, visto que cada cultivar possui arquitetura e potencial produtivo distintos

O comprimento das espigas apresentou incremento à medida que se aumentaram as doses de nitrogênio, embora de forma relativamente discreta. Observa-se que, mesmo com a elevação dos níveis de adubação nitrogenada, o crescimento das espigas foi gradual, mantendo valores próximos entre si nas menores doses (figura 9).

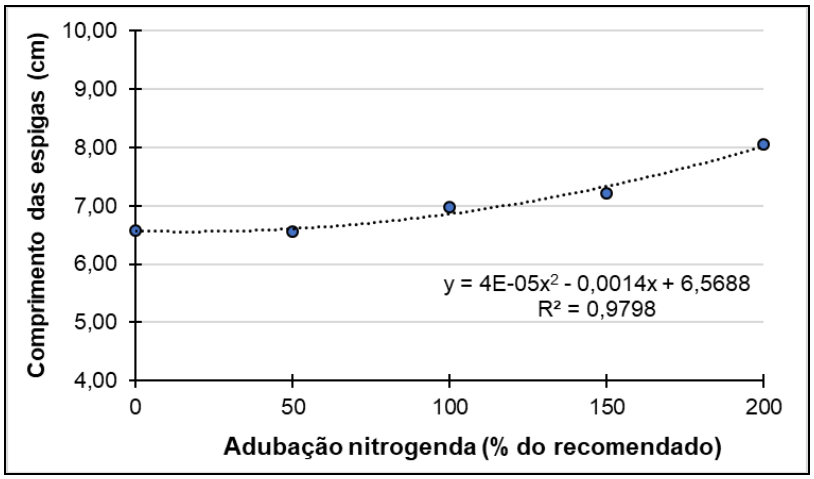
ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 8 – Comprimento das espigas (cm) de diferentes cultivares de trigo.



*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott (p<0,05). Fonte: Autores (2025).

Figura 9 – Comprimento das espigas (cm) de diferentes cultivares de trigo em função de diferentes doses de nitrogênio.



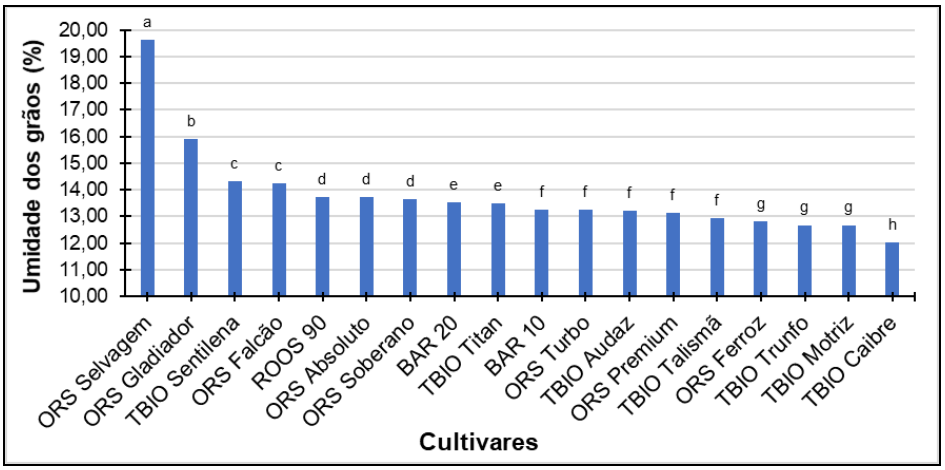
Fonte: Autores (2025).

O comprimento de espiga é um dos componentes diretos do rendimento, mas neste trabalho a resposta às doses foi pouco significativa. Isso é condizente com outros estudos que indicam que o N influencia mais fortemente o número de espigas e de grãos por espiga do que o comprimento em si (SILVA et al., 2018). Assim, o efeito encontrado está de acordo com a literatura, que sugere ganho mais expressivo em produtividade do que em tamanho de espiga.

Observou-se diferença significativa na umidade final de grãos entre as cultivares de trigo avaliadas. Essa variação pode ser atribuída ao ciclo fenológico e à genética de cada material, visto que cultivares precoces tendem a apresentar menor umidade no momento da colheita, enquanto cultivares tardias podem reter mais água nos grãos (figura 10).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 10 - Umidade de grãos (%) de diferentes cultivares de trigo.

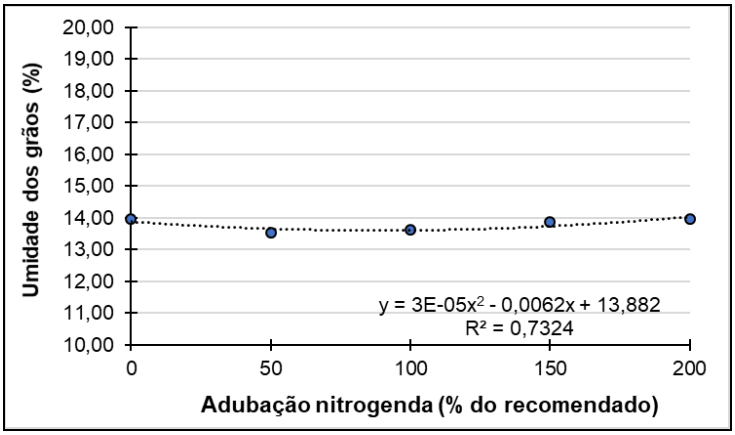


*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott (p<0,05). Fonte: Autores (2025).

Segundo Cunha et al. (2020), diferenças entre cultivares na maturação fisiológica resultam em variações na umidade de colheita, impactando diretamente o manejo pós-colheita e a qualidade dos grãos.

A umidade dos grãos aumentou de acordo com as doses de nitrogênio aplicadas. Esse comportamento pode estar associado ao prolongamento do ciclo da cultura causado pela adubação nitrogenada, uma vez que o N retarda a senescência foliar e estende o período de enchimento de grãos (figura 11).

Figura 11 - Umidade de grãos (%) de diferentes doses de adubação nitrogenada.

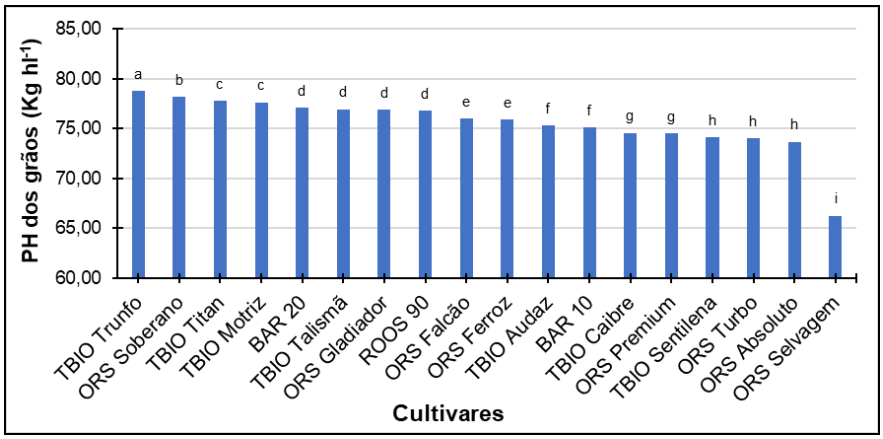


Fonte: Autores (2025).

Resultados semelhantes foram reportados por Ferreira et al. (2019), que verificaram que a adubação nitrogenada influencia não apenas a produtividade, mas também a maturação da cultura, podendo elevar os teores de umidade nos grãos colhidos. O peso do hectolitro variou significativamente entre cultivares, demonstrando que este parâmetro de qualidade é altamente dependente da genética do material. Cultivares mais modernas, geralmente desenvolvidas para atender às exigências da indústria, tendem a apresentar maior estabilidade do PH, refletindo grãos mais densos

e uniformes. Isso demonstra que, não só a dose de N, mas também a genética da cultivar influencia esse parâmetro de qualidade (figura 12).

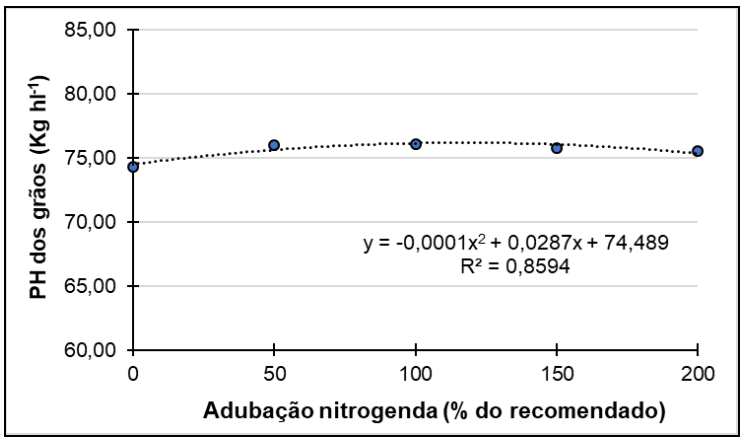
Figura 12 - Peso do Hectolitro (PH) de diferentes cultivares de trigo.



*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ($p<0,05$). Fonte: Autores (2025).

Segundo Silva et al. (2018), o PH é uma característica de elevada herdabilidade, sendo fortemente influenciado pela cultivar e em menor grau pelo manejo, o que reforça os resultados observados. O aumento das doses de nitrogênio influenciou positivamente o PH até certo limite, após o qual não foram observados ganhos adicionais expressivos. Isso pode ser explicado pelo fato de que o N favorece o enchimento dos grãos, aumentando sua densidade, mas doses excessivas podem causar acamamento e atrasar a maturação, prejudicando a qualidade (figura 13).

Figura 13 – Peso do Hectolitro (PH) em diferentes doses de adubação nitrogenada.



Fonte: Autores (2025)

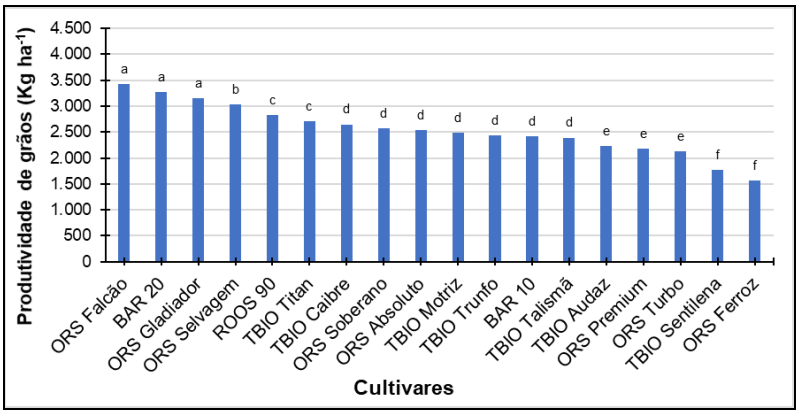
Buzetti et al. (2019) também relataram que doses moderadas de nitrogênio são benéficas para o PH do trigo, porém aplicações acima do recomendado não resultam em incremento na qualidade tecnológica dos grãos.

A produtividade variou entre cultivares, com destaque para a ORS Falcão, BAR20 e ORS Gladiador, que se mostraram as mais responsivas à adubação

ISBN 978-65-990392-6-3

nitrogenada. Essa diferença reforça a importância da escolha adequada do material genético, uma vez que cultivares mais eficientes no uso do N podem expressar maior potencial produtivo (figura 14).

Figura 14 – Produtividade de grãos de cultivares de trigo.

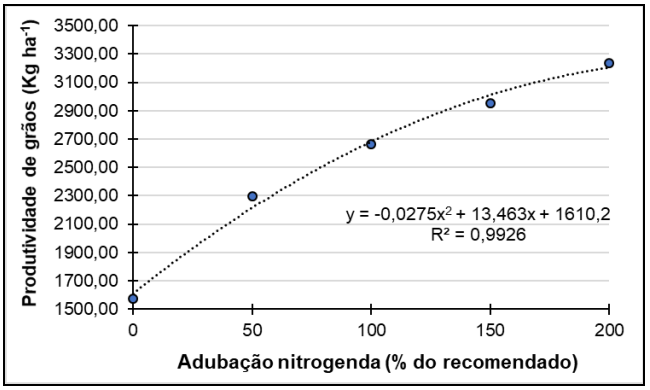


*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott (p<0,05). Fonte: Autores (2025).

De acordo com Teixeira Filho et al. (2018), a resposta à adubação nitrogenada é variável entre cultivares, sendo que algumas apresentam maior eficiência no uso do nutriente, o que se traduz em maior rendimento de grãos.

Foi observado um incremento gradual da produtividade de trigo com o aumento das doses de nitrogênio. Esse resultado confirma o papel essencial do N no rendimento da cultura, principalmente por contribuir para o aumento do número de espigas e de grãos por espiga (figura 15). O destaque da cultivar ORS Falcão mostra que há materiais mais eficientes no uso de N, o que deve ser considerado no manejo. Porém, doses muito elevadas podem trazer risco de acamamento, como já reportado por Zagonel et al. (2002).

Figura 15 – Produtividade de grãos da cultura do trigo em função de diferentes doses de adubação nitrogenada.



Fonte: Autores (2025).

No entanto, doses muito elevadas podem trazer riscos, como acamamento e aumento da umidade na colheita, comprometendo a qualidade e a eficiência

econômica do sistema produtivo. Cavalcante et al. (2020) relataram que a produtividade do trigo tende a crescer com o incremento de N até aproximadamente 150 kg ha^{-1}, havendo tendência de estabilização ou até redução acima desse patamar.

4 CONCLUSÃO

O estudo evidenciou que a resposta das cultivares de trigo à adubação nitrogenada em cobertura varia conforme o material genético (cultivar) e as doses aplicadas, influenciando características como altura de plantas, comprimento das espigas, umidade dos grãos, peso do hectolitro (PH) e produtividade.

Enquanto o efeito genético foi determinante na estatura e no comprimento das espigas, a adubação nitrogenada mostrou maior impacto na altura, umidade e produtividade de grãos, sendo que doses moderadas favoreceram melhores valores de PH e produtividade, com destaque para as cultivares ORS Falcão, BAR20 e ORS Gladiador.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS) pela disponibilização da Estação Agronômica, cuja estrutura foi fundamental para a condução deste experimento.

REFERÊNCIAS

BUZETTI, S. et al. Efeito de doses e épocas de aplicação de nitrogênio em trigo irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, e0180019, 2019.

CAMPONOGARA, A. S.; OLIVEIRA, G. A.; GEORGIN, J.; ROSA, A. L. Avaliação dos componentes de rendimento do trigo quando submetido a diferentes fontes de nitrogênio. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria**, v. 20, n. 1, jan.-abr. p. 524−532, 2024. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/92f3/ce3a1549ee8043b1400717a2eef3aa93c3a4.pdf >. Acesso em:28/05/2025.

CAVALCANTE, J. A. et al. Adubação nitrogenada em cobertura e desempenho agronômico do trigo no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 2, e5674, 2020.

CQFS-RS/SC. Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – **Núcleo Regional Sul**, 2016.

CUNHA, G. R. et al. Qualidade tecnológica e variabilidade de cultivares de trigo no Sul do Brasil. Passo Fundo: **Embrapa Trigo**, 2020. (Documentos).

ISBN 978-65-990392-6-3

EMBRAPA. Informações técnicas para a cultura do trigo e triticale – safra 2023. Passo Fundo: **Embrapa Trigo**, 2023.

FERREIRA, M. C. et al. Desempenho de cultivares de trigo em função da adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 9, p. 699-705, 2019.

KUHNEM, P. et al. Informações técnicas para trigo e triticale: safra 2020. Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale. Biotrigo Genética: Passo Fundo-RS, 2020.

OLIVEIRA, A. C. et al. Efeito de doses de nitrogênio sobre características agronômicas de trigo em Latossolo Vermelho. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 59, n. 3, p. 247-254, 2016.

SILVA, R. R. et al. Componentes de rendimento do trigo influenciados pela adubação nitrogenada. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 17, n. 4, p. 483-491, 2018.

TEIXEIRA FILHO, M. C. M. et al. Doses e formas de aplicação de nitrogênio no trigo em sistema irrigado. **Revista Ceres**, v. 65, n. 4, p. 326-334, 2018.

TREVIZAN, S. Importância do nitrogênio no metabolismo das plantas. **Revista Nucleus**, v. 14, n. 1, p. 27-36, 2017.

ZAGONEL, J. et al. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio em trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 12, p. 1713-1720, 2002.

CAPÍTULO 38

AGRICULTURA DIGITAL E AGROMETEOROLOGIA DE PRECISÃO NO MANEJO DA FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA: AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ECONÔMICA

Agricultura digital e agrometeorologia de precisão no manejo da ferrugem asiática da soja: avaliação da eficiência econômica

Laura Beatriz Schott[1], Luiz Felipe Silveira Pavão[2], Emanoel Rolim de Farias[1], André Müllich[3], Jaqueline Sgarbossa[4], Luciano Zucuni Pes[4], Ivan Carlos Maldaner[4]; Marcelo Silveira Farias[4]

[1]Estudante de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, 97105-900, Santa Maria – Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: laura.beatriz@acad.ufsm.br; emanoelrolim80@gmail.com
[2]Estudante de Mestrado em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. E-mail: felipepavao14@gmail.com
[3]Estudante de Mestrado em Agricultura de Precisão, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. E-mail: andre.mullich@hotmail.com
[4]Docente, Departamento de Ensino, Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. E-mail: sgarbossa.jaqueline@ufsm.br; lucianopes@politecnico.ufsm.br; ivan.maldaner@ufsm.br; marcelo.farias@ufsm.br

RESUMO

A soja (*Glycine max* L.) é uma das principais culturas do Brasil, mas sofre severas perdas pela ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*). Este estudo avaliou o desempenho econômico de diferentes manejos fitossanitários durante a safra 2024/25 em Santa Maria (RS), comparando aplicações calendarizadas e manejos baseados em sistemas de alerta que integraram dados meteorológicos e coletores de esporos. Os resultados mostraram que o manejo calendarizado apresentou menor rentabilidade devido ao maior número de pulverizações. Já os manejos orientados por alerta, especialmente o biológico, alcançaram maior lucratividade e reduziram o uso de fungicidas. Conclui-se que a agricultura de precisão contribui para maior eficiência econômica e sustentabilidade no controle da ferrugem asiática.

Palavras-chave: Ferrugem asiática. Manejo fitossanitário. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Soybean (*Glycine max* L.) is one of Brazil's main crops but suffers severe losses from Asian soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*). This study evaluated the economic performance of different management strategies during the 2024/25 season in Santa Maria, Brazil, comparing calendar-based fungicide applications with warning system-based strategies that integrated meteorological data and spore traps. Results showed that calendar management had the lowest profitability due to more applications, while warning-based strategies, especially the biological treatment, achieved higher returns and reduced fungicide use. Precision agriculture thus improves economic efficiency and sustainability in soybean rust control.

Keywords: Asian soybean rust. Disease management. Sustentability.

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) é uma das principais espécies de interesse agrícolas cultivadas no Brasil, ocupando posição estratégica no cenário mundial como fonte de proteína e óleo vegetal. O Brasil consolidou-se como maior produtor e exportador global, com destaque para a região Sul, responsável por parcela significativa da produção nacional (CONAB, 2025). Entretanto, a sustentabilidade e a rentabilidade da cultura estão constantemente ameaçadas por fatores bióticos e abióticos, entre os quais se destaca a ferrugem asiática da soja, causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi*, considerada a doença mais severa da cultura (GODOY et al., 2016).

A forte correlação da produção com as dependências climáticas também impõe desafios para a cultura, especialmente no que se refere a doenças. Neste cenário, a ferrugem asiática da soja é considerada uma das principais ameaças à cultura, capaz de prejudicá-la e diminuir sua produtividade (EMBRAPA SOJA, 2022), ocasionando perdas superiores a 90% de produtividade quando não há controle efetivo (Godoy et al., 2016).

O fungo *Phakopsora pachyrhizi*, tem a capacidade de infectar diretamente a epiderme foliar da soja, sendo sua infecção condicionada a fatores ambientais específicos. A germinação dos esporos ocorre de forma eficiente em temperaturas entre 15 °C e 30 °C, com desempenho ótimo entre as faixas de temperatura de 20 °C a 25 °C (Yorinori et al., 2005). Além disso, o processo infeccioso, exige umidade relativa do ar acima de 90%, para a germinação dos esporos e subsequente penetração nos tecidos da folha (Del Ponte et al., 2006). Ainda, é necessário um período mínimo de molhamento foliar de 6 a 8 horas sequenciais, sob condições ótimas e subótimas de temperatura, respectivamente.

O manejo dos fitopatógenos tem sido tradicionalmente pautado em aplicações calendarizadas de fungicidas, realizadas com intervalos fixos e independentes da presença do patógenos ou das condições ambientais. Embora essa prática proporcione certo nível de segurança ao produtor, resulta em aumento do custo de produção, pressão de seleção para resistência de patógeno, riscos ambientais e dependência crescente de insumos químicos (YORINORI et al., 2005; JULIATTI et al., 2019). Nesse cenário, surge a necessidade de adotar estratégias de manejo mais eficientes, capazes de associar eficiência econômica e redução de impactos ambientais, bem como a obtenção de produtividades satisfatórias.

A agrometeorologia de precisão se destaca como uma ferramenta promissora nesse contexto, ao integrar dados climáticos para monitoramento da favorabilidade ambiental ao desenvolvimento de doenças. Ao considerar o triangulo da doença composto pela interação entre hospedeiro, patógeno e ambiente, torna-se possível prever momentos críticos de risco epidemiológicos e orientar aplicações mais assertivas de fungicidas (FARIAS et al., 2007; SINCLAIR et al., 2010). Essa abordagem racionaliza o uso de insumos, reduz custos e contribui para sistemas de produção mais sustentáveis.

Entre as tecnologias empregadas nesse processo, o uso do coletor de esporos tem se destacado por permitir a detecção da presença do patógeno no ambiente. Esse recurso, associado a estações meteorológicas e critérios de favorabilidade ambiental, constitui um sistema de alerta eficiente, no qual a tomada de decisão passa a ser realizada com base em evidências científicas que consideram temperatura, umidade relativa e molhamento foliar.

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque (RS) · cotrijal · UFSM

A adoção dessas tecnologias é ainda mais relevante em contextos de variabilidade climática acentuada, como os observados em anos de ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña, que alteram padrões de temperatura e precipitação pluviométrica no sul do Brasil, impactando diretamente a epidemiologia da ferrugem asiática da soja (ALVARES et al., 2013; AGRICULTURE, 2020). Dessa forma, o uso de agrometeorologia de precisão não apenas auxilia na redução de perdas produtivas, mas também contribui para a mitigação de riscos climáticos e fitossanitários.

Assim, estudos que integrem o uso de ferramentas como coletores de esporos a dados meteorológicos para o monitoramento da favorabilidade ambiental da ferrugem asiática são fundamentais para validar e aprimorar sistemas de alerta aplicáveis em condições reais de campo. Sendo assim, este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho econômico da soja cultivada sob estratégias fitossanitárias para o manejo da ferrugem asiática.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O experimento em campo foi conduzido durante a safra 2024/2025, com a cultura da soja, em área experimental pertencente ao Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria, na cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Sul do Brasil, sob as coordenadas geográficas 29º43’40” S e 53º45’19” W, com altitude de 105 m. A área experimental é utilizada para fins de ensino, pesquisa, extensão e inovação, servindo como base para o desenvolvimento de estudos aplicados à agricultura e ao manejo de culturas, o que garante condições adequadas para a realização dos trabalhos.

O clima da região é do tipo Cfa, conforme a classificação climática de Köppen, correspondendo ao clima subtropical úmido, apresentando verões quentes, com temperaturas médias acima de 22 °C no mês mais quente, e inverno frios, com ocorrência de geada e, ainda, a precipitação tende a ser bem distribuída ao longo do ano (Alvares et al. 2013). O solo da área experimental é classificado como Argissolo Bruno-Acinzentado (Santos et al., 2018), sendo caracterizado pelo acúmulo de argila no horizonte subsuperficial em relação à camada superficial, tratando-se em geral, de um solo profundo e com elevada acidez e presença de alumínio.

A cultivar utilizada foi a BMX Fibra IPRO, caracterizada pelo grupo de maturação 6.4, sendo semeada dia 04 de dezembro de 2025 e a colheita no dia 24 de abril de 2025. A população de plantas foi de encontro à recomendação para a cultivar, isto é, 260.000 plantas/ha e o espaçamento entre linhas de 0,45 m. As sementes de soja foram submetidas à inoculação com *Bradyrhizobium japonicum* e *Azospirillum brasilense*.

2.2 COLETA, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

O experimento foi conduzido em delineamentos em blocos casualizados, composto por quatro tratamentos e quatro repetições. A parcelas foram delimitadas com 7 metros de comprimento e 3,5 metros de largura, totalizando uma área de 24,5 m² cada unidade experimental. Os tratamentos aplicados corresponderam a diferentes estratégias de manejo fitossanitário para o controle da ferrugem asiática da soja,

ISBN 978-65-990392-6-3

sendo: químico multissítio (MS) e sítio específico (SE) em aplicações calendarizadas, químico (MS + SE) conforme sistema de alerta, biológico associado ao químico (MS) conforme sistema de alerta e biológico conforme sistema de alerta (Tabela 1). Essa estrutura experimental permitiu a comparação entre métodos distintos de controle de doenças.

No tratamento denominado calendarizado, foram realizadas cinco aplicações com intervalos fixos de 12 a 15 dias ao longo do ciclo da cultura, independentemente da presença de condições favoráveis ao desenvolvimento da doença, com rotação dos fungicidas e seus ingredientes ativos. Já nos demais tratamentos, as aplicações ocorreram de forma pontual, baseadas em um sistema de alerta fundamentado no triângulo da doença, ou seja, considerando a ocorrência simultânea de condições favoráveis de temperatura do ar, umidade relativa do ar e a presença do patógeno.

Tabela 1 - Composição dos tratamentos fitossanitários empregados durante a condução do estudo e as respectivas descrições.

Tratamento	Composição	Data da Aplicação
Químico (MS + SE) - calendarizado	Clorotalonil + Carboxamida; triazol e estrobilurina	14/01/2025
Químico (MS + SE) - calendarizado	Clorotalonil + estrobilurina; pirazol carboxamida e cetona	28/01/2025 12/02/2025
Químico (MS + SE) - calendarizado	Clorotalonil + estrobilurina e carboxamida	28/02/2025
Químico (MS + SE) - calendarizado	Clorotalonil + estrobilurina e triazol	14/03/2025
Químico (MS + SE) - sistema de alerta	Clorotalonil + Carboxamida; triazol e estrobilurina	28/01/2025
Químico (MS + SE) - sistema de alerta	Clorotalonil + estrobilurina; pirazol carboxamida e cetona	19/02/2025
Biológico + Químico (MS) - sistema de alerta	*Pseudomonas fluorescens* + *Priestia megaterium* + *Bacillus spp*. + Clorotalonil	28/01/2025 19/02/2025
Biológico - sistema de alerta	*Pseudomonas fluorescens* + *Priestia megaterium* + *Bacillus spp.*	28/01/2025 19/02/2025

Fonte: Autores (2025)

O monitoramento das variáveis meteorológicas foi realizado com base nos dados fornecidos pela estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizado a aproximadamente 1.500 metros da área experimental, no Departamento de Fitotecnia da UFSM. A condição de favorabilidade para ocorrência da ferrugem asiática foi considerada quando se verificaram: (i) seis horas consecutivas de temperaturas entre 20 ° e 25 °C associadas à umidade relativa do ar (UR) ≥ ou (ii) oito

ISBN 978-65-990392-6-3

horas consecutivas de temperaturas entre 15 °C e 30 °C, também com UR ≥ 90%. Nessas situações, o período de molhamento foliar cria um ambiente propício para a germinação dos esporos. A presença do patógeno foi verificada por meio de um coletor de esporos (Figura 1), composto por uma lâmina recoberta com fita adesiva dupla face, onde os esporos presentes no ar se aderem à sua superfície.

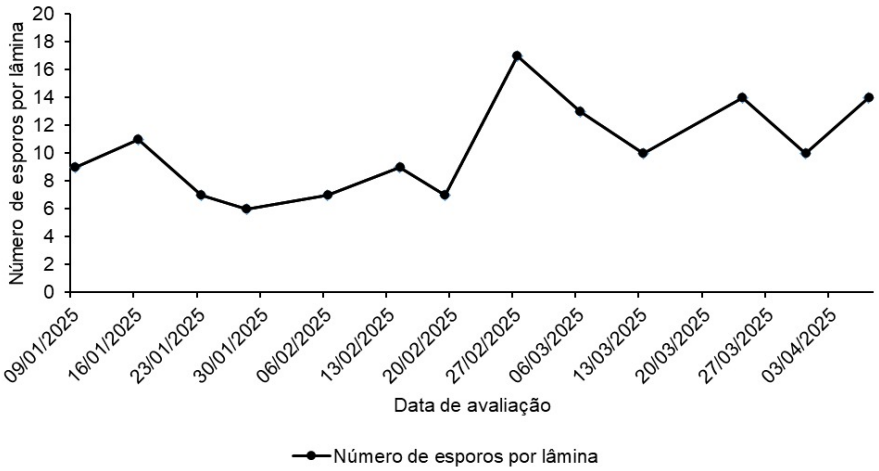
Figura 1 – Coletor de esporos instalado no campo.



Fonte: Autores (2025)

As lâminas foram avaliadas por meio de um microscópio eletrônico, para identificação e quantificação dos esporos de *Phakopsora pachyrhizi* (Figura 2). Considerou-se condição crítica quando foram contabilizados cinco ou mais esporos em conjunto com condições ambientais favoráveis por três dias consecutivos, momento em que o sistema de alerta determinava a necessidade de aplicação de fungicidas.

Figura 2 - Número de esporos de *Phakopsora pachyrhizi* durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.



Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

Ao final do ciclo da cultura da soja, foi realizada a análise econômica dos tratamentos, a qual constituiu a variável-resposta adicional do estudo. Para tanto, considerou-se o custo de investimento por hectare em fungicidas, calculado com base no preço unitário de cada produto e no número de aplicações realizadas em cada tratamento. O valor obtido foi então subtraído da receita bruta por hectare conforme a produtividade que cada tratamento alcançou, determinada pela multiplicação da produtividade de grãos (sc ha^{-1}) de cada tratamento pelo valor da saca de soja vigente no período da avaliação, fixado em R$ 120,00. Dessa forma, foi possível estimar o lucro líquido proporcionada por cada estratégia de manejo fitossanitário.

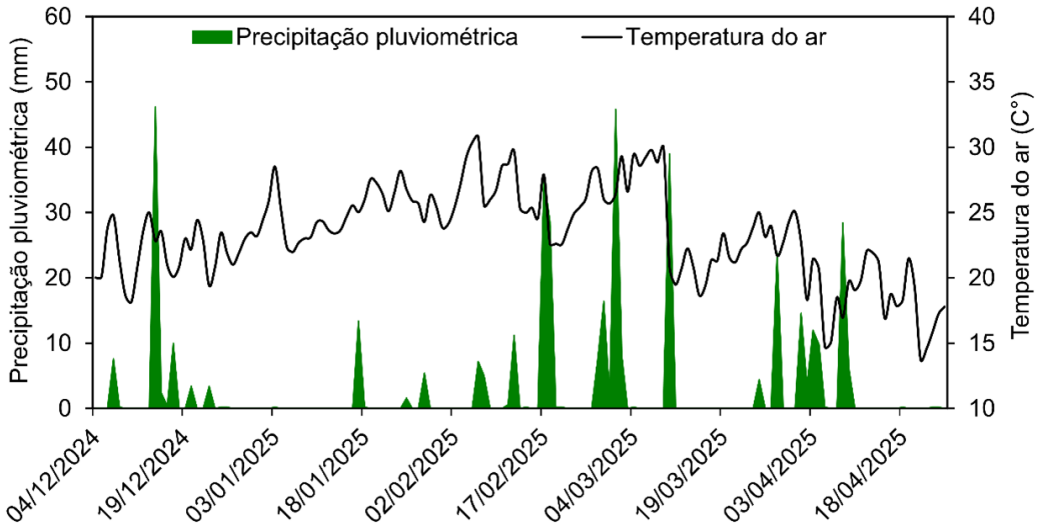
Os dados obtidos foram submetidos inicialmente à análise de pressupostos estatísticos, verificando-se a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett ($p < 0,05$). Posteriormente, procedeu-se à análise de variância (ANOVA) para avaliar os efeitos dos tratamentos. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R (R Core Team, 2024).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

Durante o período experimental, a temperatura média registrada foi de 23,3 °C (Figura 3), valor compatível com a faixa considerada ideal. No entanto, foram observados extremos térmicos de até 32,4 °C e mínimas de 6,7 °C. A precipitação pluviométrica acumulada durante o ciclo da soja foi de 405,6 mm, valor inferior a faixa considerada ideal para alcançar o máximo potencial da cultura. A necessidade total de água da cultura da soja, para atingir o máximo rendimento, varia entre 450 e 800 mm por ciclo, enquanto as condições de temperatura mais adequadas ao seu desenvolvimento situam-se na faixa de 20 °C a 30 °C (EMBRAPA, 2021).

Figura 3 - Precipitação pluviométrica e temperatura do ar ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura.



Fonte: Autores (2025)

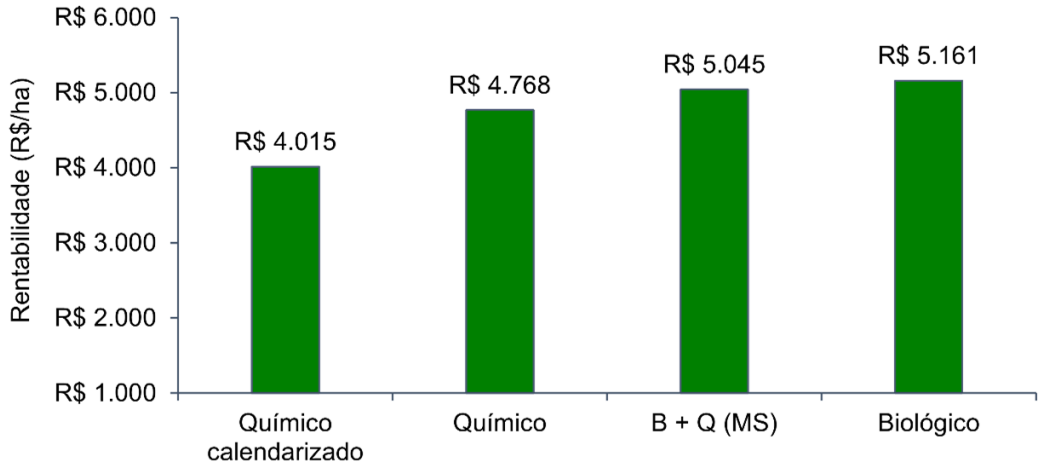
Em situações em que a cultura é exposta a extremos térmicos, isto é, quando as temperaturas excedem os limites ideais da cultura, podem ocorrer efeitos negativos sobre o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo, resultando em uma série de problemas como murcha, desfolha precoce e abortamento de vagens. Ainda, a deficiência hídrica em fases críticas, como florescimento e enchimento de grãos, pode reduzir significativamente a produtividade, uma vez que o estresse hídrico limita a taxa fotossintética, o crescimento vegetativo e a translocação de fotoassimilados (FARIAS et al., 2007; SINCLAIR et al., 2010).

Considerando o manejo convencional de aplicação de fungicidas, isto é, de forma calendarizada, cuja primeira pulverização ocorre no momento de fechamento das entrelinhas, foram realizadas cinco aplicações ao longo do ciclo da cultura. Por outro lado, na estratégia baseada na formação do triângulo da doença (presença de hospedeiro, condições ambientais e ocorrência de patógeno), o número de aplicações reduziu-se para duas. Essa menor necessidade de pulverizações foi diretamente relacionada às condições meteorológicas, sobretudo devido a influência do fenômeno La Niña na safra 2024/2025.

3.2 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise de variância (ANOVA) demonstrou ausência de efeito significativo dos manejos fitossanitários sobre a análise econômica dos tratamentos (Figura 4).

Figura 4 - Análise econômica da soja cultivada sob quatro manejos fitossanitários na safra 2024/2025.



Fonte: Autores (2025)

De modo geral, observou-se que o tratamento com manejo químico calendarizado apresentou a menor rentabilidade, resultando em R$ 4.015,00 reais/ha. Esse desempenho inferior está associado ao maior número de aplicações realizadas, elevando os custos de produção.

Em contrapartida, os tratamentos baseados em sistemas de alerta mostraram-se mais eficientes economicamente. O manejo químico sob sistema de alerta alcançou R$ 4.768,00/ha, superando o modelo calendarizado em função da redução no número de aplicações de fungicidas. O tratamento combinado biológico e químico (multissítio)

apresentou rentabilidade intermediária de R$ 5.045,00 reais/ha, evidenciando que a integração de diferentes ferramentas pode proporcionar incrementos significativos na rentabilidade, mantendo retorno econômico positivo.

Ainda, o manejo exclusivamente biológico destacou-se, atingindo a maior rentabilidade entre os tratamentos, com R$ 5.161,00 reais/ha. Esse resultado demonstra o potencial dos microrganismos, sobretudo quando aliados a ferramentas da agricultura de precisão que se baseiam no monitoramento, tornando a tomada de decisão mais criteriosa, reforçando sua viabilidade como alternativa sustentável economicamente competitiva frente ao manejo convencional.

3.3 DISCUSSÕES

De forma geral, os resultados apontam que, por meio da agricultura de precisão é possível reduzir o número de aplicações, a integração de dados associados ao monitoramento da presença do patógeno, possibilitou maior eficiência econômica, além de contribuir para a sustentabilidade do sistema produtivo, permitindo a redução do uso intensivo de fungicidas químicos. Essa redução no número de aplicações está diretamente relacionada às condições meteorológicas durante o ciclo da cultura, pela distribuição de chuvas alterada, resultando em menor favorabilidade à doença (ZHANG et al., 2024).

Além dos aspectos financeiros, é importante ressaltar os benefícios para a sustentabilidade agrícola. A diminuição das aplicações auxilia no controle da resistência de patógeno, tendo em vista os princípios de controle integrado de doenças, e reduz os riscos de poluição ambiental. Dessa forma, a agricultura de precisão se apresenta como uma prática condizente com a necessidade atual dos sistemas produtivos mais eficientes, sustentáveis e capazes de se adaptar a diferentes condições. Ademais, cabe ressaltar que o uso de agentes biológicos em conjunto com sistemas de alerta demonstrou resultados promissores.

4 CONCLUSÃO

A integração de sistemas de alerta baseados no triângulo da doença, dados meteorológicos e monitoramento da presença do patógeno permitiu reduções no número de aplicações de fungicidas, aumentando a eficiência econômica e reduzindo o impacto ambiental.

O manejo convencional calendarizado ocasionou menor rentabilidade líquida em função do maior número de pulverizações, evidenciando a limitação de estratégias que considerem a variabilidade climática e epidemiológica. Em contrapartida, os manejos fundamentados na agricultura digital e agrometeorologia de precisão, especialmente aqueles que associaram práticas biológicas e químicas, demonstraram desempenho superior, alcançando maior lucratividade e eficiência no uso de insumos.

Dessa forma, isso reforça a necessidade de pesquisas voltadas à integração de práticas biológicas e digitais, promovendo um manejo integrado de doenças que potencialize os ganhos produtivos e econômicos sem comprometer a sustentabilidade do agroecossistema. Portanto, políticas públicas, programas de extensão e esforços de pesquisa devem incentivar a difusão dessas tecnologias, visando consolidar um

modelo de produção agrícola mais inteligente, sustentável e competitivo para o Brasil e o mundo.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br. Acesso em: 01 set. 2025.

DEL PONTE, E. M.; GODOY, C. V. Influência de fatores climáticos sobre a ferrugem asiática da soja no Brasil. **Tropical Plant Pathology**, v. 35, n. 3, p. 123-130, 2010.

EMBRAPA SOJA. **Ferrugem asiática da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2022. Disponível em: https://www.embrapa.br/soja. Acesso em: 02 set. 2025.

FAO. **World Agriculture Production Report**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023. Disponível em: https://www.fao.org. Acesso em: 02 set. 2025.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Circular Técnica, n. 48. Londrina: Embrapa Soja, 2007.

FARIAS, J. R. B. et al. Previsão de risco climático para a cultura da soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 15, n. 1, p. 29-39, 2007.

GODOY, C. V. et al. Asian soybean rust in Brazil: past, present, and future. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 5, p. 407-421, 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000500002.

JULIATTI, F. C. et al. Resistência de fungos a fungicidas inibidores da respiração mitocondrial. **Summa Phytopathologica**, v. 45, n. 1, p. 9-19, 2019.

MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília, DF: INMET, 2009. 530 p.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia**: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 02 set. 2025.

ISBN 978-65-990392-6-3

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SINCLAIR, T. R.; PURCELL, L. C.; SNELLER, C. H. Crop transformation and the challenge to increase yield potential. **Trends in Plant Science**, v. 15, n. 11, p. 546-551, 2010.

SINCLAIR, T. R. et al. Yield response of soybean to drought: a case study. **Field Crops Research**, v. 119, n. 1, p. 1-6, 2010.

YORINORI, J. T. et al. Epidemics of soybean rust (Phakopsora pachyrhizi) in Brazil and Paraguay from 2001 to 2003. **Plant Disease**, v. 89, n. 6, p. 675-677, 2005.

ZHANG, Y. et al. Integrative approaches in modern agriculture: IoT, ML and AI for disease forecasting amidst climate change. **Precision Agriculture**, v. 25, n. 1, p. 1-20, 2024.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 39

DESEMPENHO DE CULTIVARES DE SOJA EM RESPOSTA À IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR

Performance of soybean cultivars in response to supplemental irrigation

João Gabriel Fortes Peixoto[1]; Dienifer Weirich Lopes[1]; Erika Nunes Macedo[1]; Wellington da Silva[1]; Richard Massirer Prochnow[1]; Marcus Vinícius Tres[2]; Giovani Zabot[3]; Alberto Eduardo Knies[4]

[1] Estudante do Curso de Agronomia, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs), Unidade em Cachoeira do Sul - RS, Brasil, e-mail para contato <joao-peixoto01@uergs.edu.br>.
[2] Eng. de Alimentos, Me. e Dr. em Engenharia de Alimentos. Professor Adjunto da Universidade Federal de Santa Maria Campus Cachoeira do Sul - RS, Brasil <giovani.zabot@ufsm.br>.
[3] Eng. de Alimentos e Dr. em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Maria Campus Cachoeira do Sul - RS, Brasil <giovani.zabot@ufsm.br>.
[4] Eng. Agr., Me. em Ciência do Solo e Dr. em Eng. Agrícola. Professor Adjunto da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul Unidade em Cachoeira do Sul - RS, Brasil, <alberto-knies@uergs.edu.br>.

RESUMO

A disponibilidade de água no solo exerce influência sobre a produtividade de cultivares da cultura da soja. Este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho de cultivares de soja submetidas à irrigação suplementar. Um experimento em campo, foi conduzido na Estação Agronômica da Uergs, em Cachoeira do Sul,RS, utilizando-se delineamento inteiramente casualizado com parcelas subdivididas, bifatorial com três repetições, sendo o fator A composto por 46 cultivares de soja e o fator D por dois regimes hídricos (irrigado e sequeiro). Observou-se variação significativa na produtividade de grãos entre as cultivares, destacando-se a BMX Trovão com 111,53 sc ha^{-1} sob irrigação e a DM 60IX64 com 91,45 sc ha^{-1} em condição de sequeiro. De forma geral, a irrigação suplementar promoveu incremento de 59,7% na produtividade da cultura, confirmando sua relevância como estratégia para sistemas de produção mais sustentáveis e eficientes, mitigando os efeitos adversos da mudança climática.
Palavras-chave: *Glycine max* L. Regime hídrico. Produtividade de grãos.

ABSTRACT

Soil water availability influences the productivity of soybean cultivars. This study aimed to evaluate the performance of soybean cultivars subjected to supplementary supervision. A field experiment was extended at the UERGS Agronomic Station in Cachoeira do Sul, RS, using a highly randomized split-plot, bifactorial design with three replicates. Factor A consisted of 46 soybean cultivars and Factor D consisted of two water regimes (irrigated and rainfed). We observed significant variations in grain yield among cultivars, with BMX Trovão standing out with 111.53 sc ha^{-1} under control and DM 60IX64 with 91.45 sc ha^{-1} under rainfed conditions. Overall, supplementary supervision promoted a 59.7% increase in crop productivity, confirming its relevance as a strategy for more sustainable and efficient production systems, mitigating the adverse effects of climate change.
Keywords: *Glycine max* L. Water regime. Grain productivity.

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) está entre as principais oleaginosas cultivadas no mundo. No cenário agrícola global, ocupa posição de destaque, sendo o Brasil atualmente o maior produtor. De acordo com a Conab (2025), na safra 2024/2025 foram cultivados aproximadamente 47,0 milhões de hectares, resultando em uma produção estimada de 168,3 milhões de toneladas. O Estado do Rio Grande do Sul respondeu por cerca de 6,8 milhões de hectares e 21,6 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2024), reforçando a relevância da cultura tanto em nível nacional quanto estadual. Essa importância deve-se, entre outros fatores, ao elevado teor de proteína (cerca de 40%) e óleo (em torno de 20%), aliados ao elevado potencial produtivo dos grãos, características que tornam a soja estratégica para alimentação humana e animal, além da produção de biocombustíveis (SEDIYAMA et al., 2009).

Entretanto, nas últimas safras (2021/2022, 2022/2023 e 2024/2025), o Estado enfrentou severas estiagens associadas, principalmente, ao fenômeno La Niña. Esse quadro climático desfavorável reduziu a disponibilidade hídrica, acarretando prejuízos recorrentes à produção. Nesse contexto, a eventualidade meteorológica e a frequência de eventos extremos têm se consolidado como um dos principais fatores de risco para o setor agrícola, influenciando diretamente as decisões de manejo, investimentos e políticas públicas (SILVA et al., 2011).

Uma alternativa para minimizar tais impactos é o uso da irrigação suplementar, que contribui para atender às necessidades hídricas da cultura em períodos de irregularidade das chuvas, assim como, a escolha estratégica de cultivares de soja, considerando tanto a produtividade comprovada na região quanto o seu ciclo de desenvolvimento (GMR), é uma forma eficaz de mitigar os impactos negativos da instabilidade climática na colheita.

A soja apresenta maior sensibilidade à deficiência de água em duas fases críticas: no estabelecimento inicial da lavoura (da semeadura até a emergência) e durante o enchimento de grãos (FARIAS et al., 2001). Sendo assim, fatores ambientais são determinantes para a cultura da soja, representando até 80% da variação em sua produtividade (ZANON et al., 2015). Dentre os principais elementos, a sensibilidade ao fotoperíodo e à temperatura do ar interagem diretamente com a genética da cultivar, impactando o crescimento, o desenvolvimento e, por fim, o rendimento de grãos (MUNDSTOK; THOMAS, 2005).

Diante da importância econômica da soja para a região Central do Rio Grande do Sul e da recorrente preocupação com a escassez de água, torna-se essencial a realização de estudos que avaliem os efeitos da irrigação sobre a produtividade. Assim, o presente trabalho busca investigar a resposta de diferentes cultivares de soja à irrigação suplementar.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi realizado a campo durante a safra 2024/2025, na área experimental da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), Unidade de Cachoeira do Sul, RS, situada na comunidade de Três Vendas (29°53’09” S; 53°00’38” W; altitude aproximada de 113 m). O clima da região é subtropical úmido e o solo foi classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico.

Foi utilizado delineamento experimental inteiramente casualizado com parcelas subdivididas, bifatorial com três repetições, sendo o fator A composto por 46 cultivares de soja e o fator D por dois regimes hídricos (irrigado e sequeiro), totalizando 276 parcelas. Cada parcela foi composta por cinco linhas de cultivo espaçadas em 0,50 m e com 5 m de comprimento. A semeadura foi realizada em 22/11/2024, utilizando semeadora-adubadora tracionada por trator, em Sistema de Plantio Direto sobre palhada de aveia preta, centeio e nabo forrageiro.

A adubação de base foi de 420 Kg ha^{-1} da fórmula 02-30-15 e, aos 35 dias após emergência foi aplicado 180 Kg ha^{-1} de KCl. A população de plantas variou de 280 a 320 mil plantas/ha^{-1} e, os demais tratos culturais, como o controle de plantas espontâneas, pragas e doenças seguiram as indicações de Martin et al. (2022).

O manejo da irrigação foi baseado na evapotranspiração de referência (ETo), estimada pelo método FAO-Penman-Monteith. A evapotranspiração da cultura (ETc) foi determinada a partir dos coeficientes de cultura (Kc) propostos por Allen et al. (1998). O armazenamento de água no solo foi acompanhado por meio de balanço hídrico da camada de 0–35 cm de profundidade, considerando a capacidade de água disponível (CAD). O sistema de irrigação utilizado foi por aspersão convencional móvel, com vazão de 12 mm h^{-1}, sendo acionado sempre que o armazenamento de água atingia aproximadamente 40% da CAD, aplicando-se lâmina fixa de 25 mm (Figura 1).

Figura 1. Plantas de soja em pleno desenvolvimento e em irrigação suplementar.



Fonte: Autores (2025).

Antes da colheita, foram avaliadas a altura das plantas (distância do solo até o último nó na haste principal - Figura 2) e estimado o acamamento das plantas (% de plantas inclinadas em menos de 45° em relação ao solo). A colheita foi realizada em uma área útil de 2 m² por parcela, procedendo-se à limpeza, aferição da umidade e pesagem dos grãos (figura 2). Os valores obtidos foram corrigidos para 14% de umidade e convertidos para produtividade em sacas por hectare. Da massa de grãos

de cada parcela, foram pesadas 4 amostras de 100 grãos para estimativa da massa de mil grãos (MMG).

Os dados coletados foram tabulados e analisados com auxílio do *software* Sisvar e, quando foi encontrado efeito estatístico significativo, as médias foram comparadas pelos Testes Tukey (para o fator regimes hídricos) e Scott-Knott (para o fator cultivares), ambos em nível de 5 % de probabilidade de erro.

Figura 2. Avaliação da altura das plantas (a) e debulha das plantas de soja (b) e amostras de grãos das parcelas do experimento (c).



Fonte: Autor (2025).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

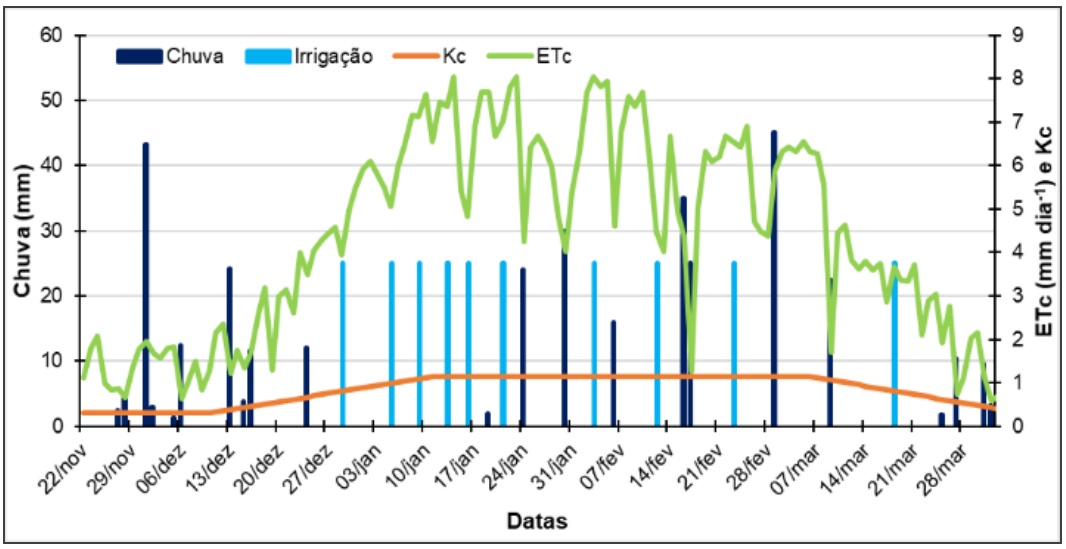
A evapotranspiração total da cultura da soja foi estimada em 576,46 mm (figura 3). Ao longo do ciclo, a precipitação pluvial acumulada atingiu 356 mm, sendo necessário complementar com 250 mm de irrigação para suprir a demanda hídrica da cultura. A safra avaliativa ocorreu sob influência do fenômeno La Niña, cuja maior intensidade foi registrada entre o final de dezembro de 2024 e fevereiro de 2025.

De acordo com o Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA, 2025), em dados analisados do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOOA), se vivenciou dois meses anômalos de La Niña, dezembro de 2024 e janeiro de 2025, onde houve uma tendência de Neutralidade, porém com um viés frio das águas do pacífico. Embora com intensidade moderada, o La Niña afetou o verão 2024/25 no Rio Grande do Sul, resultando em precipitações irregulares e predominância de períodos secos intercalados com episódios de instabilidade. De acordo com o INMET (2025), a Região Sul apresentou um regime de chuvas mal distribuídas, com alternância entre dias secos e momentos de instabilidade atmosférica.

A Emater/RS-Ascar anunciou a redução de 30,4% na estimativa original da produção de soja, na safra 2024/2025 em função da estiagem que atingiu o Rio Grande do Sul (CORREIO DO POVO, 2025). Berlato e Fontana (1999) salientam que as alterações anuais da produtividade de soja no sul do Brasil são função das oscilações no regime pluviométrico, o qual é fortemente influenciado pela ocorrência de fenômenos climáticos, como El Nino e La Niña.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 3 - Distribuição de chuva, irrigação, Kc e evapotranspiração da cultura durante o ciclo de desenvolvimento da soja.



Fonte: Autores (2025)

Na tabela 1 são apresentados os resultados dos indicadores estatísticos do experimento. Observa-se efeito de interação significativa entre os fatores cultivares e regimes hídricos em todas as variáveis analisadas (altura das plantas, acamamento das plantas, massa de mil grãos - MMG e, produtividade de grãos). O fator cultivares também apresentou efeito em todas as variáveis, quanto que, o fator regimes hídricos não apresentou efeito sobre a MMG.

Tabela 1. Valores de f calculado para as variáveis respostas obtidas em função dos fatores avaliados do experimento.

Fatores	Alt.	Acam.	MMG	Prod.
Cult.	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*
Reg. hídr.	0,00*	0,00*	0,06^{NS}	0,00*
Cult. x Reg. hídr.	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*
CV (%)	4,69	17,00	3,34	4,44
EP	2,06	2,05	2,59	1,41

Onde: Cult.: cultivares. Reg.Hídr: regimes hídricos. Cult. x Reg.Hídr: Análise da interação dos fatores sobre a variável resposta. CV: coeficiente de variação (%). EP: erro padrão. Alt.: altura das plantas; Acam.: acamamento das plantas. Umid.: umidade dos grãos na colheita. MMG: massa de mil grãos. Prod.: produtividade de grãos. *Efeito significativo, quando Pr<0,05. ^{ns} Efeito não significativo, quando Pr>0,05. Fonte: Autores (2025).

A altura das plantas variou entre os regimes hídricos (figura 2), sendo que, na média das 46 cultivares avaliadas no regime irrigado as plantas apresentaram 135,57 cm, enquanto que, no regime sequeiro as plantas apresentaram 80,03 cm. Para diminuir perdas de produtividade na colheita, Barros et al., (2003) ressaltam que a altura das plantas de soja não pode ser inferior a 50 cm. Dessa forma, as variedades avaliadas estão dentro das características agronômicas desejáveis para a cultura. Em

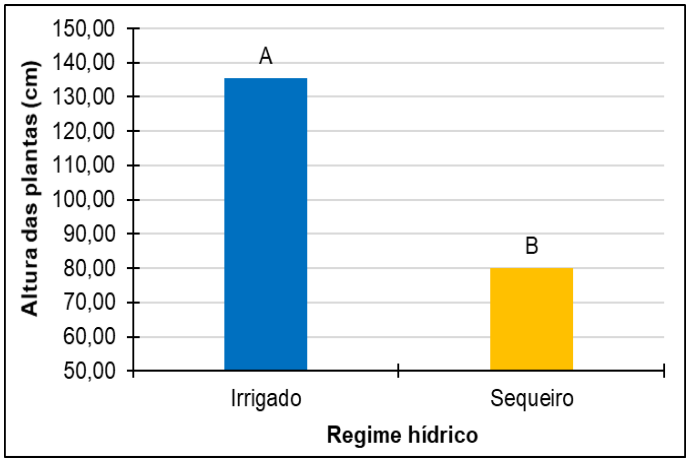
ISBN 978-65-990392-6-3

suma, as médias mais elevadas de altura foram encontradas nos tratamentos submetidos à irrigação suplementar.

A figura 4 ilustra a variação na altura média das plantas de soja em função dos regimes hídricos, revelando uma diferença substancial entre as condições de sequeiro e irrigado. As plantas cultivadas sob irrigação atingiram uma altura média de 135,57 cm, enquanto aquelas em regime de sequeiro apresentaram uma média de 80,03 cm. Essa disparidade acentuada, de aproximadamente 55,54 cm, sublinha o impacto crítico da disponibilidade hídrica no crescimento vegetativo da soja.

O suprimento adequado de água, proporcionado pela irrigação, otimiza processos fisiológicos essenciais, como a turgidez celular e a expansão dos tecidos, resultando em um maior alongamento dos entrenós e, consequentemente, em plantas mais altas e vigorosas. Este resultado reforça estudos anteriores que demonstram a correlação positiva entre a irrigação suplementar e o desenvolvimento vegetativo da soja, especialmente em fases fenológicas críticas, como o florescimento e o enchimento de grãos (ZANON et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2021).

Figura 4 - Altura média das plantas de 46 cultivares de soja nos diferentes regimes hídricos.



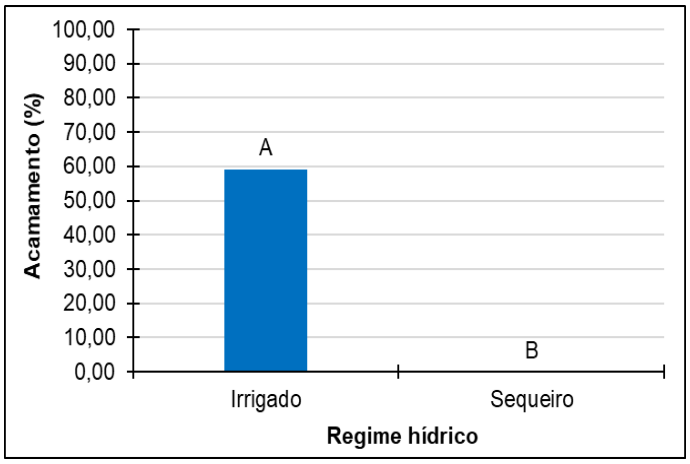
*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05).
Fonte: Autores (2025).

A maior altura das plantas em condições irrigadas é um fator determinante para o fechamento mais rápido e eficiente do dossel, o que, por sua vez, maximiza a interceptação da radiação solar e a eficiência fotossintética. Este cenário contribui diretamente para um maior potencial produtivo da cultura, uma vez que a copa das plantas bem estabelecidas é fundamental para a acumulação de biomassa e a translocação de fotoassimilados para os grãos.

A análise do acamamento médio das plantas (figura 5) revela que o regime irrigado apresentou um índice superior em comparação ao sequeiro. Este fenômeno é uma consequência direta do maior acúmulo de biomassa pelas plantas irrigadas, que, ao atingirem maior altura e densidade, tornam-se mais suscetíveis ao acamamento devido à redução da resistência mecânica do caule.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 5 - Acamamento médio das plantas de 46 cultivares de soja nos diferentes regimes hídricos.



*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05).
Fonte: Autores (2025).

A literatura científica, a exemplo dos trabalhos de Bergamaschi et al. (2004), corrobora que a maior disponibilidade hídrica pode intensificar o risco de acamamento, especialmente em cultivares com características de crescimento indeterminado ou elevada estatura. Embora o acamamento possa, em casos severos, comprometer a colheita e a qualidade dos grãos, os níveis observados neste estudo não indicaram um impacto drástico.

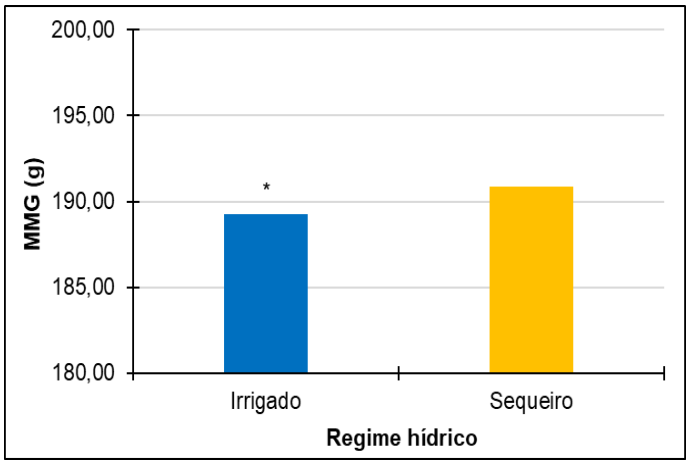
Contudo, este é um fator relevante a ser considerado no planejamento e no manejo da cultura, visando a seleção de cultivares mais resistentes ou a implementação de práticas que minimizem esse risco, como o ajuste da densidade de semeadura e a nutrição equilibrada.

A massa de mil grãos (MMG) (figura 6), demonstrou uma variação pouco expressiva entre os regimes hídricos irrigado e de sequeiro, não havendo diferença estatística significativa. Este resultado sugere que a irrigação, neste contexto, não exerceu uma influência direta e preponderante sobre o peso individual dos grãos.

Em vez disso, a irrigação parece ter impactado mais fortemente outros componentes do rendimento, como o número de vagens e grãos por planta. A literatura especializada, incluindo estudos como o de Oliveira et al. (2020b), frequentemente aponta que a MMG é um atributo menos sensível à disponibilidade hídrica, sendo sua determinação mais ligada à genética da cultivar e às condições ambientais durante a fase final de enchimento dos grãos.

Assim, embora a irrigação seja crucial para o aumento da produtividade, seu principal mecanismo de ação não se manifesta necessariamente na alteração do peso médio dos grãos, mas sim na otimização do número de estruturas reprodutivas e na garantia de um suprimento hídrico adequado para o desenvolvimento dessas estruturas.

Figura 6 - Massa de mil grãos (MMG) médio de 46 cultivares de soja nos diferentes regimes hídricos.

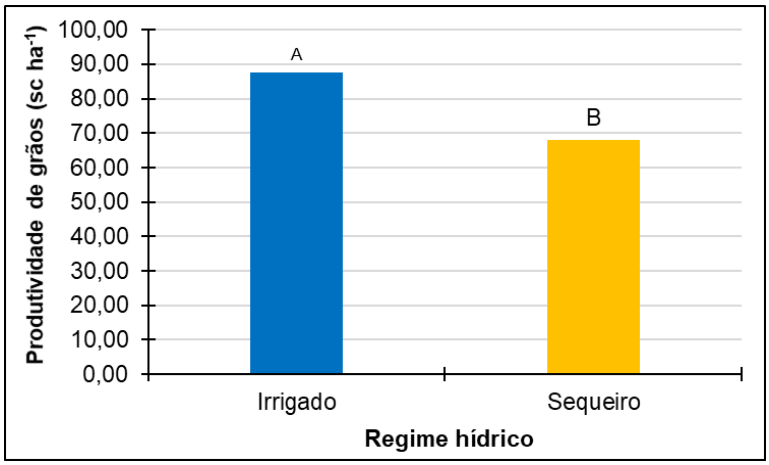


*Sem diferença estatística. Fonte: Autores (2025).

No regime de sequeiro, a produtividade média das cultivares de soja foi notavelmente reduzida (Figura 7), um reflexo direto da irregularidade hídrica observada durante o ciclo da cultura e da influência do fenômeno La Niña. A limitação de água, especialmente em fases críticas como o florescimento e o enchimento de grãos, que são estádios altamente sensíveis ao déficit hídrico, comprometeu severamente o rendimento Farias et al., 2001.

A escassez hídrica durante períodos críticos compromete o desenvolvimento adequado das vagens e o enchimento dos grãos, resultando em perdas significativas de produtividade. Este cenário evidencia a vulnerabilidade da cultura da soja a condições de estresse hídrico, particularmente em regiões onde a dependência da precipitação pluvial é elevada e frequente ocorrência de fenômenos climáticos adversos é frequente.

Figura 7 - Produtividade de grãos média de 46 cultivares de soja nos diferentes regimes hídricos.



*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05). Fonte: Autores (2025).

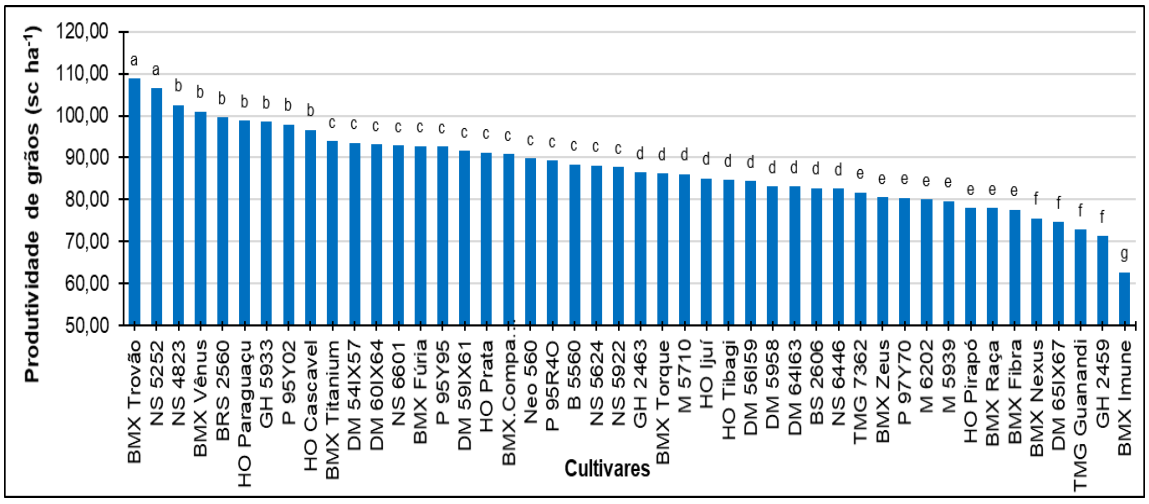
ISBN 978-65-990392-6-3

Em contraste com o regime de sequeiro, a produtividade de grãos no regime irrigado foi significativamente superior, registrando um incremento médio de 59,7%. Este aumento expressivo demonstra a eficácia do fornecimento suplementar de água em suprir a demanda hídrica da cultura, prevenindo o estresse em períodos críticos de desenvolvimento. A irrigação garante fornecimento contínuo de água as plantas, favorecendo processos fisiológicos essenciais, como a fotossíntese, o transporte de nutrientes e o desenvolvimento de grãos, mesmo em condições de baixa precipitação.

Diversos estudos, incluindo os de Oliveira et al. (2021) e Matzenauer et al. (2003), corroboram que a irrigação suplementar é um fator decisivo para assegurar altos níveis de produtividade e estabilidade em regiões propensas a estiagens recorrentes. A capacidade de mitigar os efeitos negativos do déficit hídrico permite que a soja expresse seu potencial genético máximo, resultando em colheitas de maior teto produtivo.

Na análise do desempenho das cultivares sob regime irrigado, figura 8 evidencia o desempenho superior de cultivares como a BMX Trovão e NS 5252, que atingiram valores de produtividade de 108,73 sc ha^{-1}. Este resultado demonstra o potencial produtivo máximo dos materiais genéticos quando as limitações hídricas são superadas.

Figura 8 - Produtividade de grãos de 46 cultivares de soja no regime hídrico irrigado.



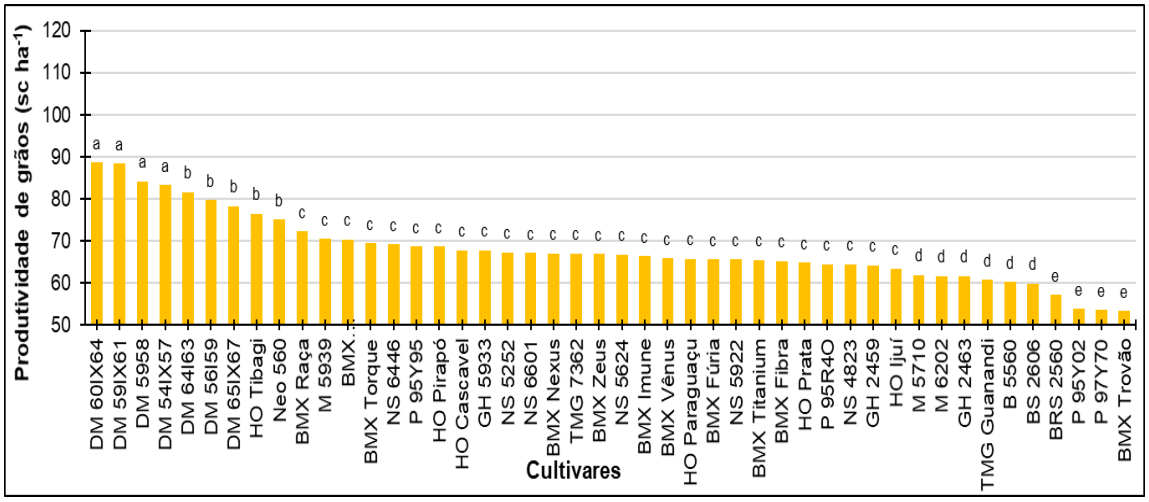
*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ($p<0,05$). Fonte: Autores (2025).

A irrigação, ao assegurar um ambiente hídrico adequado, permite que as cultivares expressem plenamente suas características genéticas, resultando em incrementos significativos de produtividade. Este comportamento confirma a interação sinérgica entre a genética da cultivar e o manejo hídrico adequado, conforme discutido por Oliveira et al. (2020a). A capacidade de mitigar os efeitos da estiagem através da irrigação, não apenas aumenta a produtividade média, mas também reduz a variabilidade de rendimento entre as safras, proporcionando maior estabilidade e segurança para os produtores.

A figura 9 fornece uma análise detalha da produtividade de grãos por cultivar no regime de sequeiro, revelando uma considerável variabilidade entre os genótipos

avaliados. Esta variabilidade destaca a importância da seleção de cultivares adaptadas às condições de estresse hídrico, uma vez que o impacto da estiagem se manifesta de forma diferenciada em cada material genético.

Figura 9 - Produtividade de grãos de 46 cultivares de soja no regime hídrico sequeiro.



*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott (p<0,05). Fonte: Autores (2025).

Cultivares que demonstraram maior estabilidade produtiva sob déficit hídrico, como a DM 60IX64, DM 59IX64, DM 5958 e DM 54IX57 são de particular interesse para regiões com regime pluviométrico irregular. A capacidade de manter um desempenho aceitável em condições adversas é um atributo genético valioso, que permite aos produtores mitigar os riscos associados à variabilidade climática. A análise individualizada por cultivar reforça a necessidade de programas de melhoramento genético focados na tolerância à seca e na identificação de genótipos que possam expressar seu potencial produtivo mesmo em ambientes com restrição hídrica.

4 CONCLUSÃO

No regime hídrico irrigado as cultivares BMX Trovão e NS 5252 apresentaram a maior produtividade (média de 108,73 sc ha^{-1}), enquanto que, no regime hídrico sequeiro, as cultivares com maior produtividade foram a DM 60IX64, DM 59IX61, DM 5958 e DM 54IX57 com uma média de 86,06 sc ha^{-1}).

A utilização da irrigação suplementar incrementou a produtividade de grãos da cultura da soja em 59,7%, mostrando ser uma importante ferramenta para a busca de sistemas mais sustentáveis de produção, mitigando os efeitos climáticos adversos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual do Rio Grande do Sul pela bolsa de pesquisa e a disponibilização da Estação Agronômica para realização do experimento.

ISBN 978-65-990392-6-3

REFERÊNCIAS

BERGAMASCHI, H. et al. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. ***Pesquisa Agropecuária Brasileira***, Brasília, v. 39, p. 831-839, 2004.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: safra 2024/25. Brasília, 2025.

EMATER/RS. **Estimativa da safra de verão 2024/2025.** Disponível em: https://www.expointer.rs.gov.br/upload/arquivos/202408/27151738-safra-de-verao-estimativa-emater.pdf. Acesso em: 17 jun. 2025.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Soja**: dados de área e produção no Brasil. Brasília, 2024.

FARIAS, J. R. B. et al. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2001. 48 p.

GALVÃO, José Roberto; SOUZA, Jhon Lenon Alves Corrêa de. **Produtividade da soja em condições de sequeiro e irrigação suplementar**. 2017. 36 p. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS, 2017.

IRGA. Instituto Rio Grandense do Arroz. **Neutralidade no Oceano Pacífico está presente desde meados de fevereiro**. Porto Alegre, 2025. Disponível em: https://irga.rs.gov.br/neutralidade-no-oceano-pacifico-esta-presente-desde-meados-de-fevereiro. Acesso em: 8 set. 2025.

MARTIN, T. N. et al. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, safras 2022/2023 e 2023/2024.** Santa Maria: Editora GR, 2022.

MATZENAUER, R. et al. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural,** Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1013-1019, 2003.

OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; BOTTEGA, E. L.; DA SILVA, C. M.; GOMES, J. I. T. Influência da irrigação suplementar na produtividade de cultivares de soja para a safra e safrinha 2018-19 e 2019-20 na região central do RS. **Brazilian Journal of Development,** Curitiba, v. 7, n. 2, p. 15580-15595, 2021. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/24666. Acesso em: 8 set. 2025.

OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; BOTTEGA, E. L.; DA SILVA, C. M. Estimativa da demanda hídrica da soja utilizando modelo de balanço hídrico do solo e dados da previsão do tempo. **Irriga**, Botucatu, v. 25, n. 3, p. 492-507, 2020b.

OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; BOTTEGA, E. L.; DA SILVA, C. M. Produtividade de cultivares de soja com e sem irrigação suplementar para a safra e safrinha de 2019/20 na região central do RS. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 11, p. 89099-89113, 2020a.

OLIVEIRA, Z. B. de; KNIES, A. E.; RODRIGUES, L. R.; SCHMIDT, D. A.; KURY, A. G. Produtividade da soja em função da época da semeadura e da irrigação suplementar na região central do RS. **Irriga**, Botucatu, v. 26, n. 4, p. 774-786, 2021. Disponível em: https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4103. Acesso em: 8 set. 2025.

ISBN 978-65-990392-6-3

SILVA, A. M. et al. Impactos climáticos e decisões na agricultura. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 19, p. 101-112, 2011.

SOUZA, C. A. S. de; FARÍAS, B. A. R.; SILVA, J. L. da; BEZERRA, J. R. C. Calibração de um medidor de umidade do solo utilizando redes neurais artificiais. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 1, p. 1-11, 2008. Disponível em: https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/500/367. Acesso em: 8 set. 2025.

ZANON, A. J. et al. **Ecofisiologia da soja**: visando altas produtividades. Santa Maria: [s. n.], 2018.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 40

DESEMPENHO AGRONÔMICO DE SOJA EM AMBIENTES DE ALTA E BAIXA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE (CEA) SOB TAXA VARIÁVEL DE SEMENTES

Agronomic performance of soybean in environments with high and low apparent electrical conductivity (AEC) under variable seeding rate

Leticia Bertote Belarmino[1]; Luiz Felipe Silveira Pavão[1]; André Müllich[1]; Andrei Pezzini Holdefer[1]; Ivan Carlos Maldaner[1]; Luciano Zucuni Pes[1]; Jaqueline Sgarbossa[1]; Marcelo Silveira de Farias[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria - RS, Brasil, leticiabb_@hotmail.com, felipepavao14@gmail.com, andre.mullich@hotmail.com, andrei.holdefer@hotmail.com, ivan.maldaner@ufsm.br, marcelo.farias@ufsm.br, lucianopes@politecnico.ufsm.br, sgarbossa.jaqueline@ufsm.br

RESUMO

O uso de ferramentas de Agricultura de Precisão (AP) é uma estratégia que tem auxiliado a agricultura a ter maior eficiência no uso dos recursos de produção. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho agronômico da cultura da soja em ambientes de alta e baixa condutividade elétrica aparente (CEa) do solo. O experimento foi conduzido na cidade de Santa Maria, RS, na safra 2024/25, utilizando o delineamento em blocos ao acaso, em bifatorial 4x2, com quatro repetições. O Fator A consistiu em quatro densidades de semeadura: 230.000; 280.000; 330.000 e 380.000 sementes por hectare. O fator B consistiu em dois ambientes de produção, caracterizados por baixa e alta condutividade elétrica aparente do solo (CEa). Foram avaliadas as variáveis-resposta produtividade de grãos (PG) e massa de mil grãos (MMG) da cultura. Não houve interação entre fatores. Houve a tendência de maior PG e menor MMG com o incremento na densidade de semeadura. Não houve diferença significativa entre os dois ambientes avaliados, para ambas as variáveis-resposta.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merr. Densidade de semeadura. Ambientes de produção.

ABSTRACT

The use of Precision Agriculture (PA) tools is a strategy that has helped agriculture achieve greater efficiency in the use of production resources. In this context, the objective of this study was to evaluate the agronomic performance of soybean in environments with high and low soil apparent electrical conductivity (AEC). The experiment was carried out in Santa Maria, RS, during the 2024/25 growing season, using a randomized complete block design in a 4×2 factorial scheme with four replications. Factor A consisted of four seeding densities: 230,000; 280,000; 330,000; and 380,000 seeds per hectare. Factor B consisted of two production environments, characterized by low and high soil apparent electrical conductivity (AEC). The response variables evaluated were grain yield (GY) and thousand-grain weight (TGW). No interaction was observed between factors. There was a trend of higher GY and lower TGW with increasing seeding density. No significant difference was found between the two environments evaluated for either response variable.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merr. Seeding density. Production environments.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, observa-se a necessidade de avanços tecnológicos em diversos setores da economia ao nível mundial, impulsionado principalmente pela necessidade em produzir cada vez com maior eficiência e sustentabilidade. Na área agrícola, os avanços tecnológicos se manifestam em máquinas com eletrônica embarcada, na genética e em outros aspectos que, em conjunto, promovem o aumento da eficiência produtiva.

Diante disso, surge o termo agricultura de precisão que, para Molin (2004), fundamenta-se na ideia de que o agricultor possa identificar as regiões de altas e baixas produtividades dos talhões e que, a partir disso, possa administrar essas diferenças com critérios agronômicos já dominados. Tendo em vista a forma como a agricultura vem sendo conduzida nas últimas décadas, segundo Pires *et al.* (2004), os produtores rurais, além de administradores, cada vez mais terão que assumir a função de pesquisadores de suas áreas, atuando diretamente na coleta de informações, interagindo com novas técnicas e tomando decisões eficazes de manejo.

Para obter precisão nas diferentes operações agrícolas realizadas em campo, é utilizado o Sistema de Informação Geográfica (SIG), ferramenta essa que possibilita o controle, monitoramento e gerenciamento efetivo dos sistemas de produção. Além de útil à agricultura de precisão, o SIG engloba a ideia de compromisso com o uso dos recursos de produção que serão utilizados pelas gerações futuras, fazendo valer a ideia de que um manejo sustentável implica algo além da manutenção dos índices de produtividade (MANTOVANI *et al.*, 1998).

Dentre as informações que podem ser geradas a partir do uso do SIG na agricultura de precisão, a condutividade elétrica aparente do solo (CEa) tem sido proposta como uma maneira alternativa de se avaliar a variabilidade espacial dos talhões agrícolas, podendo ser uma das camadas de dados utilizadas para a definição de unidades de gerenciamento em uma área agrícola (CASTRO, 2004). A condutividade elétrica do solo funciona como um indicativo direto da existência de fatores que diferem o solo e que podem estar relacionados à umidade, material de origem, fatores da fertilidade, textura, entre outros aspectos (PEREIRA *et al.*, 2012).

O teor de água e as propriedades físicas e químicas, em especial a salinidade, podem ser citados como fatores de maior influência, sendo que as mudanças de temperatura também influenciam na CEa (RHOADES, 1993 apud MOLIN, 2011). Segundo, as informações derivadas de dados de pesquisa da CE podem ser usadas para definição de zonas de manejo nas áreas agrícolas.

A soja (*Glycine max* L.) é uma das principais culturas agrícolas cultivadas no Brasil, destacando-se no cenário mundial como fonte de proteína e óleo vegetal. O Brasil consolidou-se como o maior produtor e exportador global, com destaque para a região Sul, responsável por parcela significativa da produção nacional (CONAB, 2025).

A obtenção de elevadas produtividades na cultura da soja requer, também, adequadas populações de plantas, dependentes da região, da época de semeadura e da cultivar, pela maximização dos componentes da produção. Até a década de 1980, era comum produzir soja com 400 mil pl. ha^{-1}, ou até mais. No entanto, evoluções como a elevação da qualidade das sementes produzidas no país e a recomendação de novas cultivares, possibilitaram a redução da população de plantas até cerca de 230 mil pl. ha^{-1} (ROSSI *et al.*, 2017).

Estudos realizados por Corassa *et al*. (2020) evidenciam que a cultura da soja apresenta diferentes respostas em desempenho agronômico em função da densidade de semeadura utilizada em cada ambiente de produção. Dessa forma, tem sido crescente o uso da taxa variável de sementes como ferramenta da agricultura de precisão e digital que permite alocar a densidade de semeadura ideal para cada região do talhão, de acordo com o seu potencial de produtividade. Para definir o potencial de produtividade de cada região do talhão, assim como mapear as regiões com características similares, a CEa do solo é vista como um atributo com elevado potencial de uso (SERRANO, SHAHIDIAN e SILVA, 2017)

Neste sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho agronômico da cultura da soja em ambientes de alta e baixa condutividade elétrica aparente (CEa) do solo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Área Agropecuária do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) na cidade de Santa Maria, nas coordenadas geográficas Latitude 29º43’55” Sul e Longitude de 53º45’28” Oeste e altitude de, aproximadamente, 100 metros ao nível médio do mar. O clima da região é o Cfa, subtropical úmido e com verões quentes, segundo a classificação de Köppen. O talhão agrícola em que o experimento foi instalado é denominado “Erva-Mate”, e possui solo classificado como Argissolo Bruno-Acinzentado (SANTOS *et al*., 2018).

Antes da demarcação e implantação do experimento em campo, foi realizada a mensuração da CEa, na camada de solo de 0 a 30 cm, com o auxílio do equipamento Veris U3, acoplado a um trator e tracionado sobre o solo em toda a extensão do talhão. Esse sensor móvel funciona pelo princípio da resistividade elétrica, no qual um par de discos metálicos emissores injeta uma corrente elétrica no solo, enquanto outros pares de discos receptores medem a diferença de potencial gerada. A partir dessa diferença de potencial e da intensidade de corrente aplicada, o equipamento calcula a condutividade elétrica aparente, em miliSiemens por metro (mS m^{-1}) (MACHADO *et al*., 2006; BOTTEGA *et al*., 2022).

O Veris U3 possibilita leituras simultâneas, o que amplia o potencial de diagnóstico das propriedades físicas e químicas do solo em diferentes camadas. Durante o deslocamento, as leituras são registradas de forma contínua e georreferenciadas via GPS, resultando em uma alta densidade de pontos amostrais no talhão (BOTTEGA *et al*., 2022).

Esse elevado número de observações permite caracterizar a variabilidade espacial da CEa com grande detalhe, favorecendo a identificação de zonas de manejo. Devido a essa alta densidade de dados, a interpolação espacial foi conduzida por krigagem ordinária, utilizando o plugin SmartMap (PEREIRA *et al*., 2022), do Software QGIS. Esse é considerado um método geoestatístico robusto para dados contínuos, garantindo estimativas sem viés e com variância mínima (OLIVER e WEBSTER, 2014) (Equação 1).

Krigagem Ordinária Pontual, conforme Isaaks e Srivastava (1989):

$$Z^*(x_o) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

Onde: $Z^*(x_o)$: Estimativa do valor da variável regionalizada no ponto x_o (ponto de interesse); $Z(x_i)$: Valor observado da variável no ponto x_i; λ_i: Peso atribuído ao valor observado no ponto x_i; n: Número de pontos amostrais considerados na vizinhança de x_o.

Para a aplicação da krigagem, foi utilizado o modelo de semivariograma ajustado, definido pela Equação 2, assegurando a seleção do melhor ajuste aos dados e maior confiabilidade nas estimativas geradas.

Semivariograma experimental:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

Onde: $\gamma(h)$: valor do semivariograma para a distância de separação h. Mede a variabilidade espacial da variável Z; $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$: valores da variável regionalizada em dois pontos separados por uma distância h; $N(h)$: Número de pares de pontos separados por h; h: Distância (ou vetor de separação) entre os pontos considerados.

Para a avaliação do desempenho agronômico da cultura da soja, o experimento foi implantado no sistema plantio direto, sobre palhada de trigo em uma lavoura recém-colhida. A semeadura foi realizada no dia 26 de novembro de 2024, com uma semeadora-adubadora da marca Massey Ferguson, modelo MF 509 H45, equipada com 9 linhas de semeadura, espaçadas entre si em 0,45 m. A semeadora utilizada é equipada com o mecanismo dosador pneumático e apresenta motor elétrico para acionamento do disco alveolado em cada linha de semeadura, permitindo o monitoramento e a distribuição de sementes em taxa variável.

O experimento foi demarcado em campo seguindo o delineamento em blocos ao acaso, em bifatorial 4x2, com quatro repetições. O Fator A consistiu em quatro densidades de semeadura: 230.000; 280.000; 330.000 e 380.000 sementes por hectare. O fator B consistiu em dois ambientes de produção, caracterizados por baixa e alta CEa.

Foi utilizada a cultivar de soja NEO 531 I2X, com grupo de maturação 5.3 e caracterizada por possuir potencial de ramificação médio e alta exigência em fertilidade, segundo informações da empresa detentora. A adubação consistiu na aplicação de 300 kg ha^{-1} da fórmula NPK 02-23-23 na linha de semeadura e 200 kg ha^{-1} de cloreto de potássio em cobertura, quando a Cultura estava em estádio V3, seguindo a escala fenológica proposta por Fehr & Caviness (1977).

Durante o ciclo de desenvolvimento, o manejo fitossanitário foi realizado de acordo com as recomendações técnicas para a cultura da soja. Foram avaliadas as variáveis-resposta produtividade de grãos (PG, kg ha^{-1}) e massa de mil grãos (MMG, g). Com o auxílio do programa computacional Sisvar, os dados foram submetidos à ANOVA. Em caso de não haver interação entre os fatores avaliados, mas haver efeito significativo dos diferentes níveis de cada fator, será realizada análise de regressão para o Fator A (densidades de semeadura) e comparação de médias, pelo teste de Scott-Knott, para o Fator B (ambiente de produção), utilizando nível de 5% de probabilidade de erro.

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque (RS) · cotrijal · UFSM

A colheita foi realizada manualmente, no dia 22 de abril de 2025, por meio da coleta de duas linhas de 4,5 de comprimento cada, totalizando área de coleta de 4,05 m^2 por unidade experimental. Após colhidas, as plantas passaram pelo processo de trilha, limpeza e quantificação da massa de grãos, a qual foi extrapolada para a massa de grãos por hectare, com umidade corrigida para 13%, para determinar a produtividade de grãos. A massa de mil grãos foi estimada a partir da pesagem de 300 grãos da amostra, com posterior extrapolação para mil grãos.

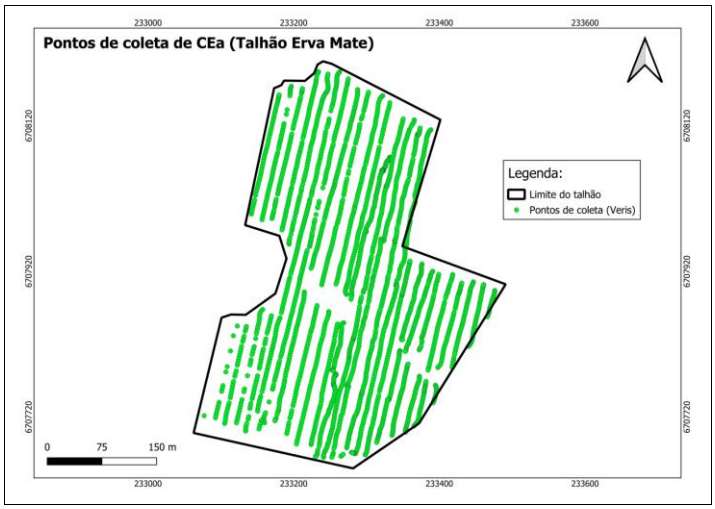
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A safra 2024/25 foi marcada pela ocorrência do Fenômeno La Niña no Rio Grande do Sul. No local do experimento, o acumulado total de precipitação, da semeadura até a colheita, foi de 429,8 mm (INMET, 2025), com a presença de longos períodos sem chuvas. A soja demanda precipitação acumulada de 450-800 mm (EMBRAPA, 2013), ou seja, as condições meteorológicas observadas foram limitantes para o desenvolvimento da cultura e prejudicou o desempenho agronômico final.

A ocorrência do Fenômeno La Niña representa um desafio para os produtores rurais e demanda de ainda mais atenção aos fatores agronômicos envolvidos no momento da semeadura, como a garantia da densidade de semeadura adequada ao ambiente de produção.

O mapa de pontos de coleta da CEa (Figura 1) ilustra a elevada densidade de observações obtidas pelo sensor Veris U3, registradas em linhas contínuas, que cobriram toda a extensão do talhão. Essa configuração resultou em uma resolução espacial detalhada, permitindo identificar variações internas do solo que dificilmente seriam detectadas por amostragens convencionais. Comparativamente, a representatividade dessa base de dados é significativamente superior à coleta tradicional de solo, que apresenta baixa densidade amostral e maior custo operacional.

Figura 1 – Mapa dos pontos de coleta de CEa no talhão Erva-Mate.



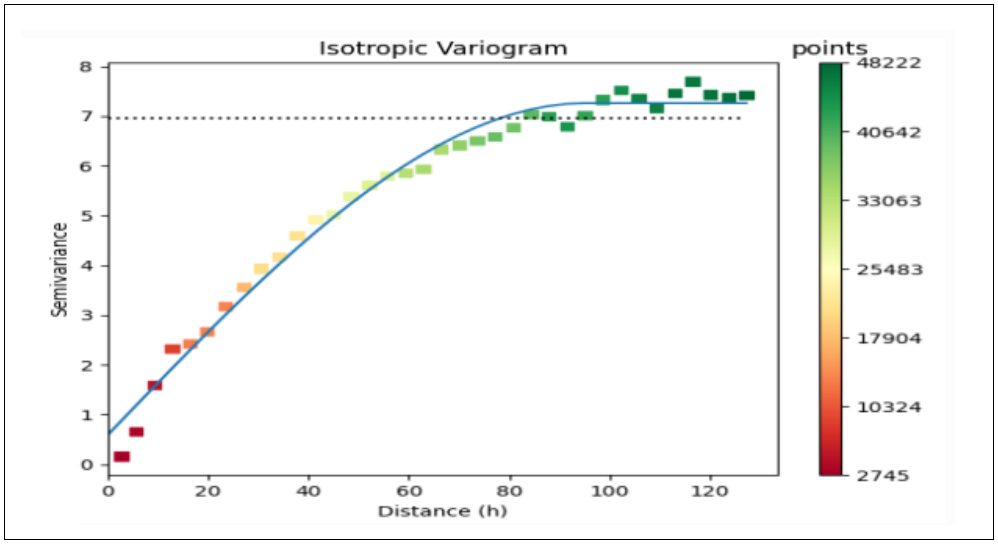
Fonte: Autores (2025)

Conforme destacado por Bottega *et al*. (2022), essa é uma das principais vantagens do uso de sensores de condutividade elétrica aparente em agricultura de

precisão, trazendo a possibilidade de mapear atributos estáveis do solo com grande detalhe, de forma rápida e com menor custo em relação às análises laboratoriais. Essa riqueza de informações favorece a caracterização da variabilidade espacial e fornece subsídios consistentes para a delimitação de zonas de manejo.

O ajuste do semivariograma experimental (Figura 2) isotrópico da CEa do talhão Erva Mate foi realizado com o modelo esférico, que apresentou desempenho adequado em representar a estrutura de dependência espacial dos dados. Os parâmetros estimados foram: efeito pepita (C_0) = 0,598, patamar (C_0 + C_1) = 7,261 e alcance (a) = 95,262 m. O efeito pepita relativamente baixo indica que apenas uma pequena parcela da variabilidade não foi explicada pelo modelo, refletindo boa representatividade da estrutura espacial. O patamar próximo de 7,3 demonstra a estabilização da semivariância em distâncias superiores ao alcance, valor que confirma a existência de dependência espacial até aproximadamente 95 metros. O coeficiente de determinação do ajuste foi elevado (R^2 = 0,985), associado a um erro quadrático médio reduzido (RMSE = 2,405), evidenciando a adequação do modelo ajustado em relação ao variograma empírico.

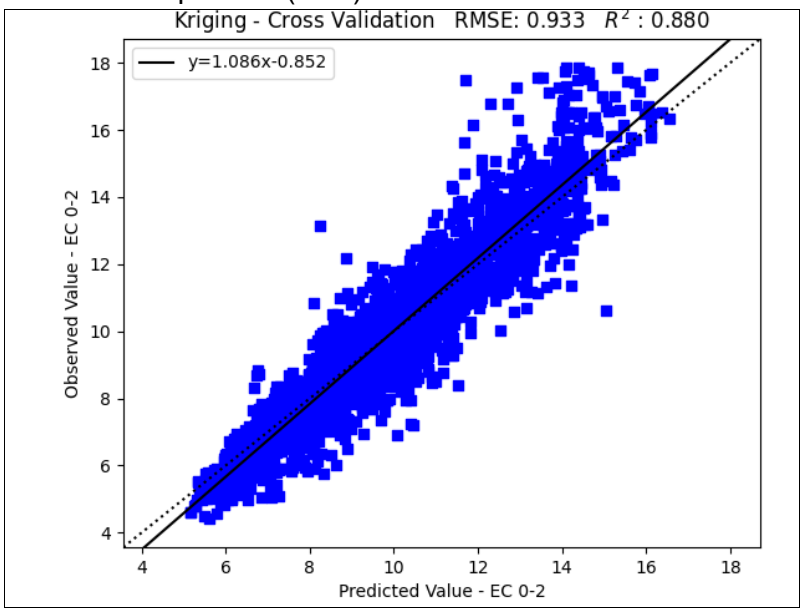
Figura 2 - Semivariograma isotrópico ajustado para a condutividade elétrica aparente (CEa) no talhão Erva-Mate.



Fonte: Autores (2025)

Com base nesse semivariograma, procedeu-se à interpolação por krigagem ordinária, assegurando estimativas não tendenciosas e com variância mínima. Para verificar a qualidade preditiva do modelo, foi realizada a validação cruzada (Figura 3), na qual cada ponto amostral é estimado a partir dos demais. Os resultados evidenciaram forte correlação entre os valores observados e preditos (R^2 = 0,880), além de um erro quadrático médio (RMSE = 0,933) considerado baixo frente à amplitude da variável. A equação da reta de regressão obtida (y = 1,086x – 0,852) demonstrou tendência positiva e próxima da bissetriz, confirmando a consistência das estimativas.

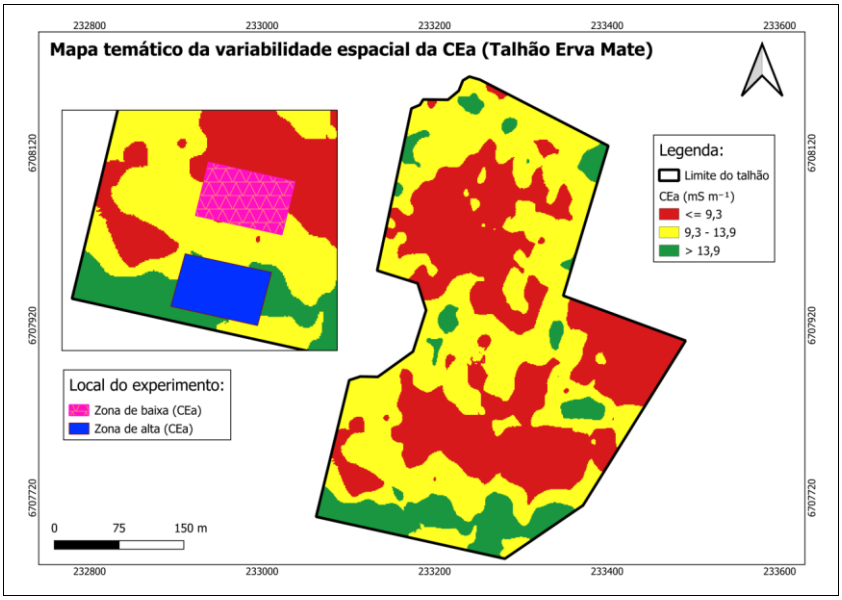
Figura 3 - Validação cruzada da krigagem ordinária para a condutividade elétrica aparente (CEa) no talhão Erva-Mate.



Fonte: Autores (2025)

O mapa temático da CEa (Figura 4) evidenciou que a maior parte do talhão Erva-Mate apresenta valores de baixa condutividade elétrica aparente (≤ 9,3 mS m⁻¹), concentrados principalmente nas regiões norte, central e leste. Essas áreas coincidem com os pontos de menor teor de argila identificados no mapa textural, reforçando a presença de solos mais arenosos, caracterizados por menor capacidade de retenção de água e nutrientes e maior suscetibilidade à lixiviação. Em contrapartida, áreas de condutividade intermediária (9,3–13,9 mS m⁻¹) e alta (>13,9 mS m⁻¹) foram observadas predominantemente na porção sul do talhão, além de pequenas manchas distribuídas em outras regiões, locais que também apresentaram maior teor de argila.

Figura 4 – Mapa temático para variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo.



Fonte: Autores (2025)

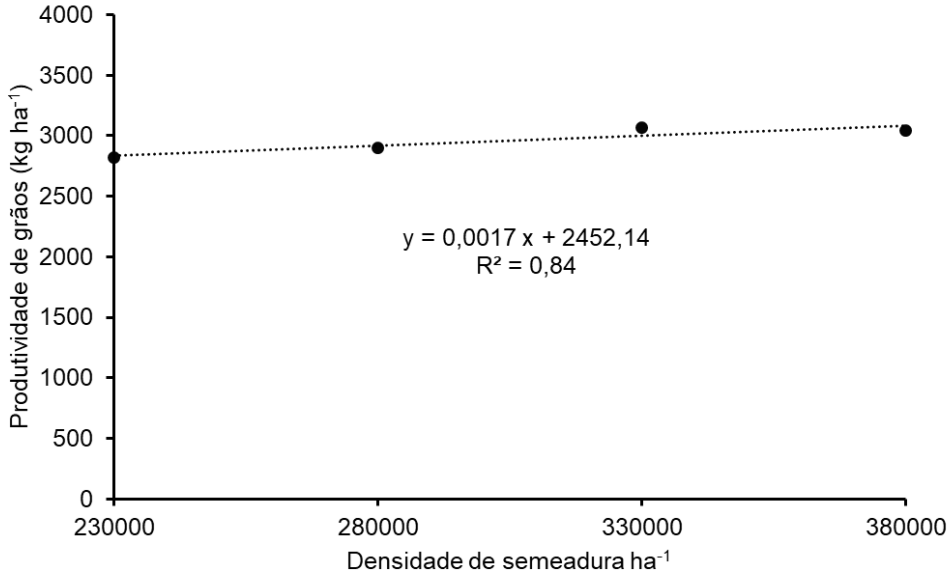
ISBN 978-65-990392-6-3

Referente aos resultados de desempenho agronômico, de acordo com a ANOVA, não houve interação entre o Fator A (densidade de semeadura) e o Fator B (ambiente de produção) para as duas variáveis-resposta avaliadas. Dessa forma, os dois ambientes de produção utilizados apresentaram a mesma tendência de resposta ao uso de diferentes densidades de semeadura. Houve diferença significativa entre os níveis do Fator A para ambas as variáveis-resposta, e não se observou diferença significativa entre os níveis do Fator B para essas mesmas variáveis.

Para a produtividade de grãos com o uso de diferentes densidades de semeadura, ajustou-se a equação de linear y = 0,0017 x + 2452,14 (Figura 5), indicando que houve aumento linear da produtividade de grãos com o incremento da densidade de semeadura. Este resultado possivelmente está associado ao fato de que, em ambientes caracterizados como de baixa produtividade, a cultura da soja apresenta a tendência de maior produtividade de grãos quando é utilizada maior população de plantas (CORASSA *et al*, 2020). No caso deste estudo, um fator determinante para caracterizar o ambiente como de baixa produtividade foi o déficit hídrico, o qual evidentemente limitou a expressão dos demais fatores envolvidos.

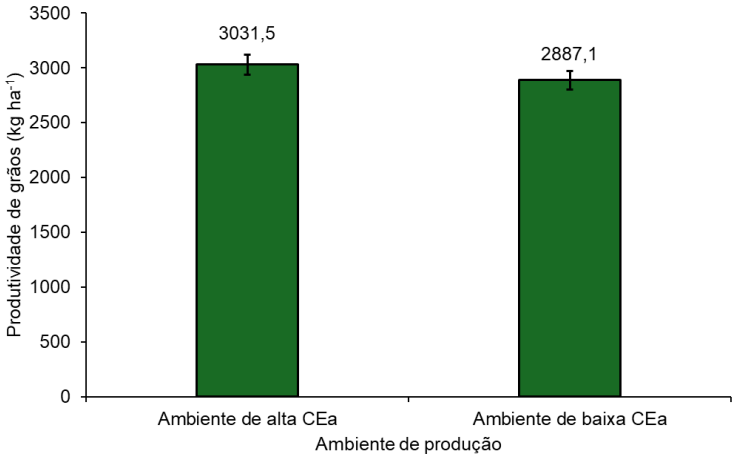
Considerando os dois ambientes de produção utilizados neste estudo, não houve efeito significativo sobre a produtividade de grãos da cultura da soja. Apesar disso, observa-se a tendência de maior produtividade no ambiente de alta CEa (Figura 6). Este resultado possivelmente foi obtido devido ao fato de que o ambiente com maior CEa apresenta a tendência de maior teor de umidade no conteúdo do solo (PEREIRA *et al*. 2012). Por ser um ano de déficit hídrico, a presença de maior umidade foi determinante para a tendência observada.

Figura 5 – Produtividade de grãos da cultura da soja com o uso de diferentes densidades de semeadura.



Fonte: Autores (2025)

Figura 6 - Produtividade de grãos da cultura da soja nos diferentes ambientes de produção definidos no estudo.

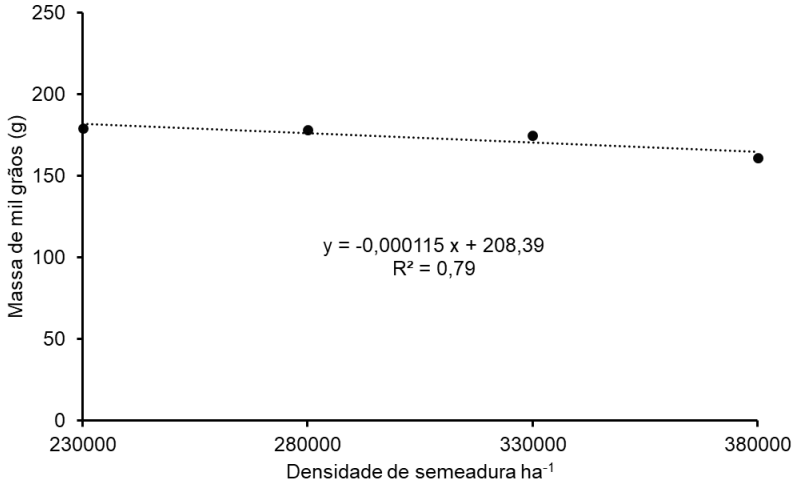


Fonte: Autores (2025)

Para a massa de mil grãos com o uso de diferentes densidades de semeadura, ajustou-se a equação de linear y = -0,000115 x + 208,39 (Figura 7), indicando que houve redução linear da massa de mil grãos com o incremento da densidade de semeadura. Este resultado possivelmente está associado ao fato de que o incremento na densidade de semeadura e, consequentemente, na população de plantas, ocasionou maior competição por água, luz e nutrientes. Por ser um ano de déficit hídrico, possivelmente a competição por água limitou a massa de mil grãos, apesar de não ter limitado a produtividade de grãos geral.

Considerando os dois ambientes de produção utilizados neste estudo, não houve efeito significativo sobre a massa de mil grãos da soja. Apesar disso, observa-se a tendência de maior massa de mil grãos no ambiente de alta CEa (Figura 8). Este resultado possivelmente também está associado ao fato de que o ambiente com maior CEa apresenta maior umidade e, sendo um ano de déficit hídrico, a maior umidade do solo foi determinante para a tendência observada.

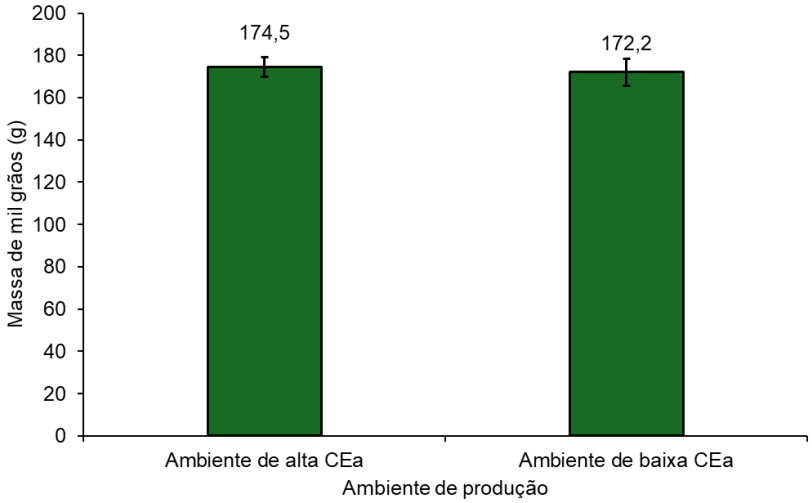
Figura 7 – Massa de mil grãos da cultura da soja com o uso de diferentes densidades de semeadura.



Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 8 – Massa de mil grãos da cultura da soja nos diferentes ambientes de produção definidos no estudo.



Fonte: Autores (2025)

4 CONCLUSÃO

Nas condições em que este estudo foi conduzido, o uso de maior densidade de semeadura promoveu maior produtividade de grãos para a cultura da soja. Por outro lado, quando avaliada a massa de mil grãos, existe a tendência da maior densidade de semeadura promover resultados inferiores.

Na safra avaliada, não houve diferença significativa entre produtividade de grãos e massa de mil grãos entre as regiões de alta e baixa CEa. Apesar disso, existe a tendência do ambiente com maior CEa apresentar resultados superiores para ambas as variáveis-resposta.

REFERÊNCIAS

BOTTEGA, E. L. *et al*. Site-Specific management zones delineation based on apparent soil electrical conductivity in two contrasting fields of Southern Brazil. **Agronomy,** v.12, p.1390. 2022.

CASTRO, C. N. **Definição de unidades de gerenciamento do solo por meio da sua condutividade elétrica e variáveis físico-químicas.** 2004. 131 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos.** Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br. Acesso em: 01 set. 2025.

CORASSA, G. M *et al*. Taxa Variada de sementes: da variabilidade a oportunidade. **Revista Plantio Direto**, v. 176, p. 21-27, 2020.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja –** Região Central do Brasil 2013. Londrina: Embrapa.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. (Special Report, 80). 12 p.

GIRARDELLO, V. C. *et al*. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, 2014.

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. **Banco de Dados Meteorológicos**, 2025. Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/. Acesso em: 02 set. 2025.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

MACHADO, P. L. O. A. *et al*. Condutividade elétrica do solo. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (org.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**: ecossistemas tropicais e subtropicais. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2006. p. 381-402.

MANTOVANI, E. C.; QUEIROZ, D. M.; DIAS, G. P. Máquinas e operações utilizadas na agricultura de precisão. In: SILVA, F. M. da (Coord.). **Mecanização e agricultura de precisão**. Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998. p. 109-157.

MOLIN, J. P. Tendências da agricultura de precisão no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO. **Anais...** Piracicaba – SP, ESALQ/USP, 2004.

MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 546–555, 2011.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, v. 113, p. 56-69, 2014.

ISBN 978-65-990392-6-3

PEREIRA, G. W. *et al*. Smart-Map: An open-source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging. **Agronomy**, v.12, n.6: 1350, 2022.

PEREIRA, L. de V. *et al*. Mapeamento da condutividade elétrica do solo como ferramenta para gerenciamento agrícola visando reduzir impactos ambientais. In: 3º SEMINÁRIO DE GESTÃO AMBIENTAL NA AGROPECUÁRIA. **Anais...** Bento Gonsalves – RS, 2012.

PIRES, J. L. F. *et al*. **Discutindo agricultura de precisão** – aspectos gerais. Brasília: MAPA, 2004. Disponível em: https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/precisao/livros/DISCUTINDO%20AGRICULTURA%20DE%20PRECISAO%20ASPECTOS%20GERAIS.pdf.

ROSSI, F. R.; CAVARIANI, C; FRANÇA-NETO, B. J de. Vigor de sementes, população de plantas e desempenho agronômico de soja. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of agriculture and Environmental Sciences**. v. 60, n. 3, p. 216-222, jul./set. 2017.

SERRANO, J. M.; SHAHIDIAN, S.; SILVA, J. M. Spatial variability and temporal stability of apparent soil electrical conductivity in a Mediterranean pasture. **Precision Agriculture,** New York, n. 18, p.245–263, 2017.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 41

GERAÇÃO DE ZONAS DE MANEJO A PARTIR DA CORRELAÇÃO ENTRE TEORES DE ARGILA E DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO

Generation of management zones based on the spatial variability of soil clay content and electrical conductivity

Murillo Rodrigues Dias[1]; Fernanda Facco Cechin[1]; André Müllich[1]; Luiz Felipe Silveira Pavão[1]; Ivan C. Maldaner[1]; Marcelo S. Farias[1]; Luciano Z. Pes [1]; Jaqueline Sgarbossa[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima nº 1000, 97105-900, Santa Maria – RS, Brasil, diasmurillomrd@gmail.com, fernanda.cechin@outlook.com, andre.mullich@hotmail.com, felipepavao14@gmail.com, ivan.maldaner@ufsm.br , marcelo.farias@ufsm.br, lucianopes@politecnico.ufsm.br, sgarbossa.jaqueline@ufsm.br

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo integrar dados de textura do solo (teores de argila) e da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) para a criação de zonas de manejo. Para a CEa, devido ao grande número de pontos amostrais, foi possível aplicar geoestatística com ajuste de semivariograma e krigagem, permitindo a avaliação da variabilidade espacial. Já para os teores de argila, considerando o número reduzido de pontos (15), utilizou-se interpolação determinística por IDW, visando estimar a distribuição dos valores no talhão. A integração dos atributos foi realizada por meio de buffer zones de 10 m, correlacionando valores médios de CEa e argila pelo coeficiente de Pearson. Os resultados mostraram correlação positiva entre CEa e teor de argila, confirmando que áreas mais argilosas apresentaram maior condutividade elétrica. A partir dessa relação, foi elaborado o mapa de zonas de manejo, evidenciando a aplicabilidade da integração de dados de solo e sensores para compreender a heterogeneidade do talhão e subsidiar práticas de agricultura de precisão mais eficientes e sustentáveis, como a adequação da população de plantas e a utilização de insumos em taxa variável.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Textura do solo. Zonas de manejo.

ABSTRACT

The present study aimed to integrate soil texture data (clay content) and soil apparent electrical conductivity (CEa) for the creation of management zones. For CEa, due to the large number of sampling points, it was possible to apply geostatistics with semivariogram fitting and kriging, allowing the assessment of spatial variability. For clay content, given the reduced number of points (15), deterministic interpolation by IDW was used to estimate the distribution of values within the field. The integration of attributes was performed using 10 m buffer zones, correlating mean values of CEa and clay through Pearson's coefficient. The results showed a positive correlation between CEa and clay content, confirming that more clayey areas exhibited higher electrical conductivity. Based on this relationship, a management zone map was developed, highlighting the applicability of integrating soil and sensor data to understand field heterogeneity and to support more efficient and sustainable precision agriculture practices, such as adjusting plant population and applying inputs at variable rates.

Keywords: Precision agriculture. Soil texture. Management zones.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão tem como um de seus princípios fundamentais o manejo das lavouras considerando a variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta, buscando otimizar a eficiência do uso de insumos e maximizar a produtividade de forma sustentável. Diferentemente da concepção tradicional de que o talhão agrícola é homogêneo, reconhece-se que existem diferenças internas significativas, associadas a fatores de difícil modificação, como textura do solo, profundidade dos horizontes, relevo e capacidade de armazenamento de água, que resultam em potenciais produtivos distintos (CORWIN; LESCH, 2005).

Nesse contexto, a definição de zonas de manejo surge como alternativa viável para reduzir a variabilidade interna das áreas cultivadas e possibilitar intervenções mais assertivas. Zonas de manejo podem ser definidas como áreas espacialmente contíguas que podem ser tratadas como homogêneas em termos de práticas agrícolas, permitindo o ajuste de insumos, população de plantas e até mesmo genótipos utilizados.

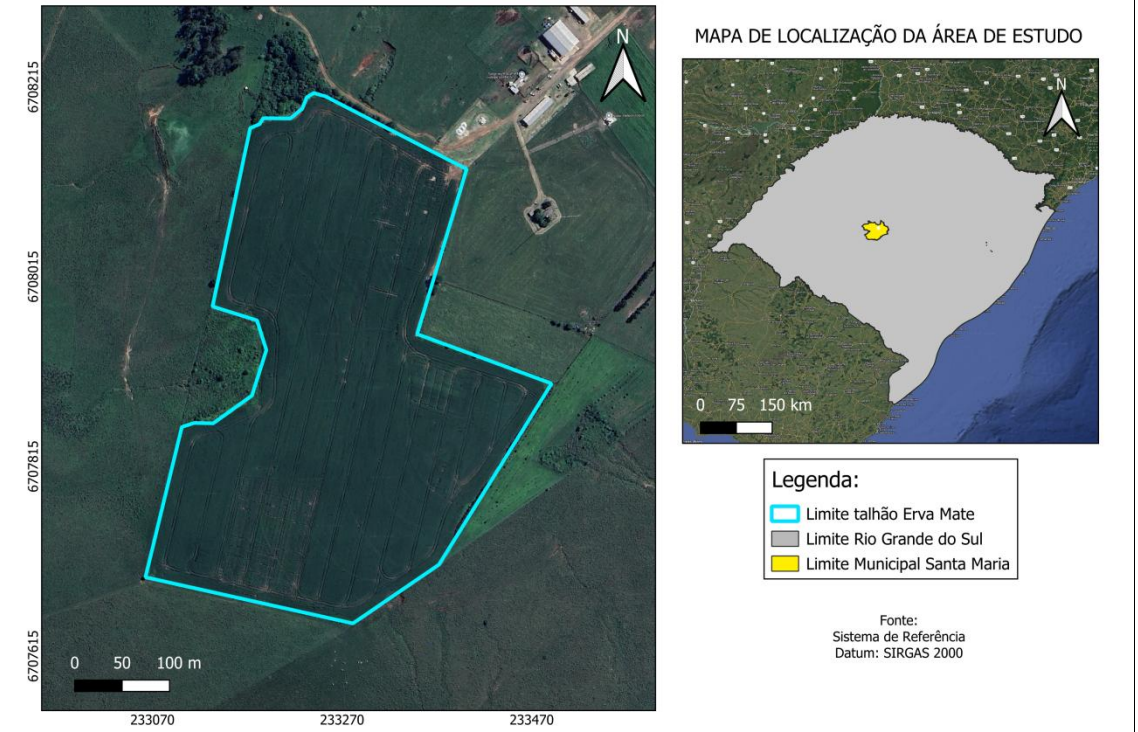
Entre os atributos do solo mais utilizados para subsidiar a geração dessas zonas, destacam-se os teores de argila e a condutividade elétrica aparente do solo (CEa). A textura, em especial o teor de argila, é um parâmetro de grande relevância, pois influencia diretamente a capacidade de retenção de água, a dinâmica de nutrientes e a estrutura do solo, impactando o desenvolvimento das culturas (JOHNSON et al., 2003; MOLIN; RABELLO, 2011). A CEa, por sua vez, tem se consolidado como um indicador indireto de propriedades edáficas estáveis, apresentando forte relação com a textura, a capacidade de troca de cátions (CTC) e a umidade, o que a torna uma ferramenta promissora para a detecção da variabilidade espacial em campo (CORWIN; LESCH, 2005; MOLIN et al., 2005; MACHADO et al., 2006).

Assim, a integração dos mapas de argila e de CEa, por meio de técnicas de geoestatística e de agrupamento, possibilita a delimitação de zonas de manejo mais consistentes. Esse procedimento favorece a aplicação localizada de insumos, reduz custos de produção, minimiza impactos ambientais e viabiliza a semeadura em taxa variável, consolidando-se como prática essencial para a sustentabilidade da agricultura moderna (PERALTA et al. 2013). Diante disso, este estudo teve como objetivo utilizar da interpolação de valores dos teores de argila e do mapeamento da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo para a criação de zonas de manejo em área agrícola, buscando compreender a heterogeneidade do talhão e subsidiar práticas de manejo mais eficientes e sustentáveis.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para compreender tal variabilidade e definir posteriormente zonas de manejo, um estudo foi realizado no município de Santa Maria – RS, na Área Agropecuária do Colégio Politécnico da UFSM, em um talhão denominado Erva Mate (Figura 1), com área de 13,53 ha. A metodologia deste trabalho consistiu em correlacionar dados de variabilidade espacial de solo de difícil modificação ao longo do tempo, como a condutividade elétrica aparente do solo (CEa) e a classificação textural (teores de argila) para a criação de zonas de manejo.

Figura 1 - Localização e delimitação do talhão em estudo, denominado Erva Mate, na Área Agropecuária do Colégio Politécnico.



Fonte: Autores (2025)

Para a caracterização textural, procedeu-se no ano de 2020 a coleta de solo na profundidade de 0–20 cm, utilizando-se um grid amostral de 1 ponto por hectare, totalizando 15 pontos amostrais distribuídos no talhão. Cada ponto foi composto por cinco subamostras, distanciadas em 10 metros entre si, e homogeneizadas para obtenção da amostra composta. As análises laboratoriais permitiram a determinação dos teores de argila, sendo os níveis classificados de acordo com o Manual de Adubação e Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2016).

A interpolação dos teores de argila foi realizada pelo método *Inverse Distance Weighting* (IDW) (Equação 1), recomendado em situações com poucos pontos amostrais e dados espaçados, permitindo a estimativa de valores da variável de interesse em locais não amostrados (MOLIN; RABELLO, 2011). A estimativa foi realizada utilizando a Equação (1), proposta por Shepard (1968):

$$Z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{Z(x_i)}{d(x_0,x_i)^P}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d(x_0,x_i)^P}} \quad (1)$$

Em que,

$Z(x_0)$: Valor interpolado no ponto x_0.
$Z(x_i)$: Valor observado no ponto x_i (com i =1, 2, ..., n).
$d(x_0,x_i)$: Distância entre o ponto de interpolação x_0 e o ponto conhecido x_i.

P: Expoente de ponderação (geralmente 2, mas ajustável), que define a taxa de decaimento da influência com a distância.
n: Número total de pontos conhecidos usados na interpolação.

O mapeamento da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) foi realizado com o equipamento Veris U3 (Figura 2), acoplado a um trator e tracionado sobre o solo em toda a extensão do talhão. O equipamento realiza leituras representativas da CEa na camada de 0-30 cm. Esse sensor móvel funciona pelo princípio da resistividade elétrica, no qual um par de discos metálicos emissores injeta uma corrente elétrica no solo, enquanto outros pares de discos receptores medem a diferença de potencial gerada. A partir dessa diferença de potencial e da intensidade de corrente aplicada, o equipamento calcula a condutividade elétrica aparente, em miliSiemens por metro (mS m^{-1}) (BOTTEGA et al., 2022).

Figura 2 – Veris U3, utilizado para coleta dos dados de condutividade elétrica aparente do solo.



Fonte: Autores (2025)

O Veris U3 possibilita leituras simultâneas, o que amplia o potencial de diagnóstico das propriedades físicas e químicas do solo em diferentes camadas. Durante o deslocamento, as leituras foram registradas de forma contínua e georreferenciadas via GPS, resultando em uma alta densidade de pontos amostrais no talhão (BOTTEGA et al., 2022).

Esse elevado número de observações permite caracterizar a variabilidade espacial da CEa com grande detalhe, favorecendo a identificação de zonas de manejo. Devido a essa alta densidade de dados, a interpolação espacial foi conduzida por krigagem ordinária, método geoestatístico robusto para dados contínuos, garantindo estimativas sem viés e com variância mínima (OLIVER; WEBSTER, 2014), conforme apresentado na Equação 2, proposta por Isaaks e Srivastava (1989):

$$Z^*(x_o) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

$Z^*(x_o)$: Estimativa do valor da variável regionalizada no ponto x_o (ponto de interesse).
$Z(x_i)$: Valor observado da variável no ponto x_i.
λ_i: Peso atribuído ao valor observado no ponto x_i.
n: Número de pontos amostrais considerados na vizinhança de x_o.

Para a aplicação da krigagem, foi utilizado o modelo de semivariograma ajustado definido pela Equação 3, assegurando a seleção do melhor ajuste aos dados e maior confiabilidade nas estimativas geradas.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

Em que:
$\gamma(h)$: Valor do semivariograma para a distância de separação h. Mede a variabilidade espacial da variável Z.
$Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$: Valores da variável regionalizada em dois pontos separados por uma distância h.
$N(h)$: Número de pares de pontos separados por h.
h: Distância (ou vetor de separação) entre os pontos considerados.

Para avaliar a relação entre os teores de argila e a CEa, procedeu-se à criação de *buffer zones* em torno de cada ponto amostral de argila, com raio de 10 m, distância essa sendo a mesma da distância entre as subamostras de argila. Dentro de cada *buffer* foi calculada a média dos valores de CEa. Estes valores médios foram correlacionados com os teores de argila por meio do coeficiente de correlação de Pearson ($p < 0,05$), conforme metodologia empregada em estudos de correlação entre atributos físicos do solo e CEa (BOTTEGA et al., 2015).

Por fim, a associação entre condutividade elétrica aparente (CEa) e argila foi analisada por meio do coeficiente de correlação de *Pearson* (Equação 4) com nível de confiança de 95%.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y - \overline{y})^2}} \quad (4)$$

Onde: xi e yi= observações dos dois atributos (teor de argila e CEa) em cada ponto *i*; $\overline{x}$ e $\overline{y}$ = médias amostrais; n = número de pares.

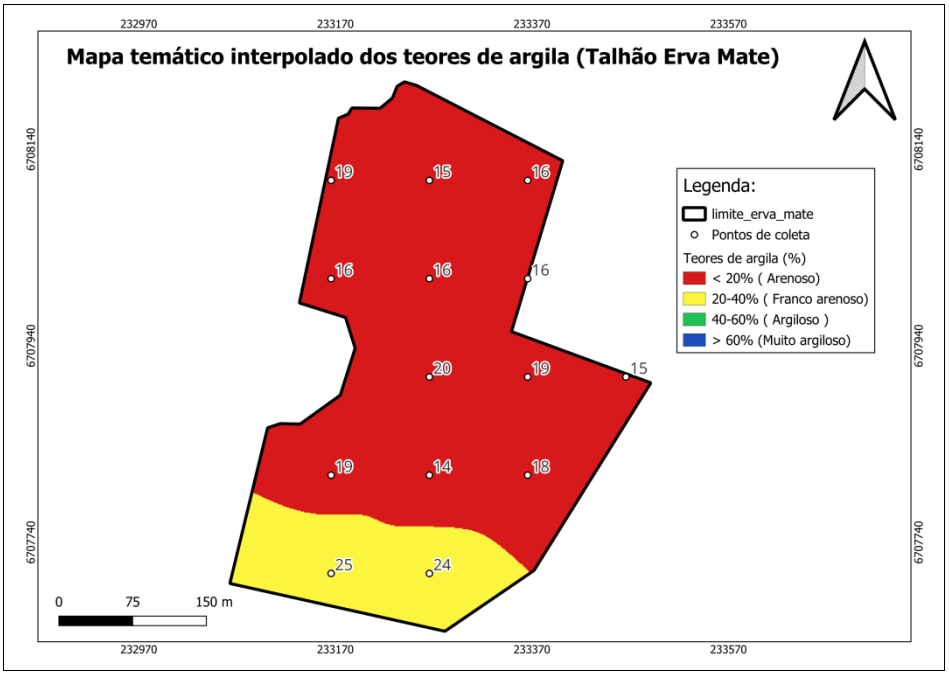
As interpolações foram realizadas no software QGIS versão 3.36.3-Maidenhead. Os teores de argila foram interpolados pelo método determinístico IDW, utilizando o algoritmo nativo do programa. Já para a condutividade elétrica aparente (CEa), aplicou-se krigagem, com ajuste do semivariograma e validação cruzada realizados por meio do plugin SmartMap (Pereira et al., 2022). A análise de correlação de Pearson entre CEa e argila foi conduzida no software RStudio. A integração das superfícies interpoladas e a delimitação das zonas de manejo foram realizadas no QGIS, por meio da Calculadora Raster, que permitiu a fusão das camadas de argila e CEa, originando o mapa final de zonas de manejo.

ISBN 978-65-990392-6-3

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No mapa temático resultante da interpolação dos teores de argila (Figura 3) foi observado que a maior proporção da área apresenta valores inferiores a 20% de argila, sendo classificada como arenosa, predominando principalmente nas porções central e norte do talhão. Essa condição indica solos com menor capacidade de retenção de água e nutrientes, além de maior susceptibilidade à lixiviação, o que pode comprometer a produtividade em condições de estresse hídrico ou baixa disponibilidade nutricional.

Figura 3 – Mapa temático interpolado dos teores de argila no talhão.



Fonte: Autores (2025)

Na parte sul do talhão, verificam-se áreas com textura franco-arenosa (20–40% de argila), representadas pelas tonalidades amarelas no mapa. Essa transição textural sugere uma zona diferenciada dentro da área, com maior capacidade de retenção de água e de nutrientes em comparação às demais regiões, podendo influenciar diretamente a resposta das culturas.

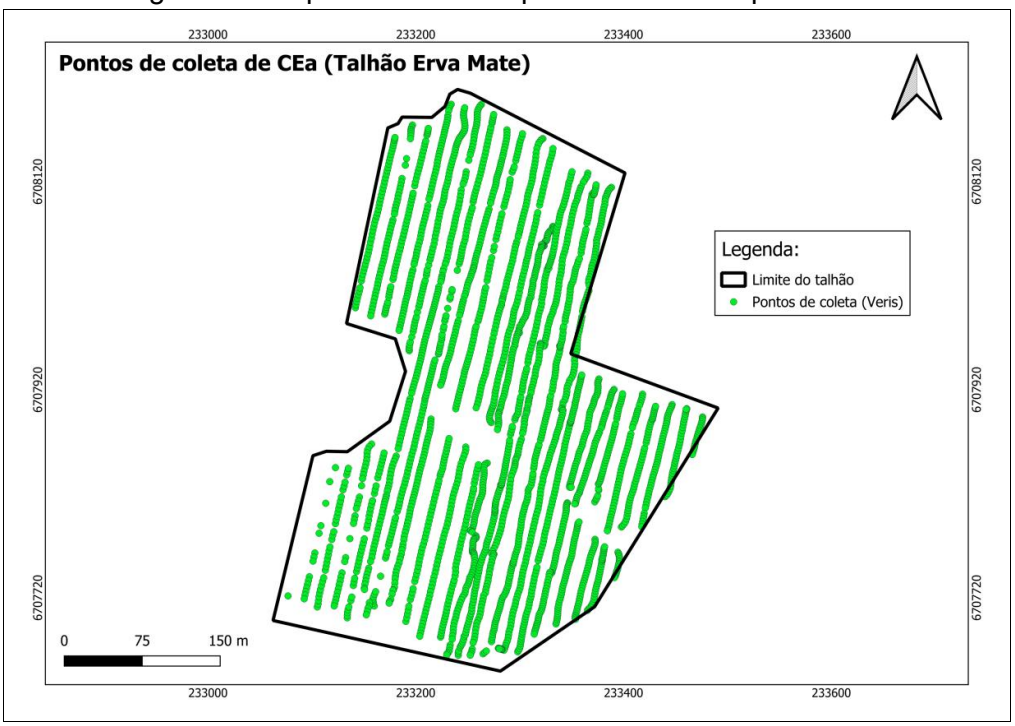
Entretanto, ressalta-se que os teores de argila, por si só, não são suficientes para delimitar zonas de manejo totalmente consistentes, sendo necessária a associação com outros atributos do talhão, como a CEa, produtividade e índices de vegetação, de modo a integrar variáveis de maior estabilidade e de resposta temporal distinta. Essa integração possibilita gerar zonas mais representativas da heterogeneidade da área e, consequentemente, apoiar recomendações de manejo mais precisas.

O mapa de pontos de coleta da CEa (Figura 4) ilustra a elevada densidade de observações obtidas pelo sensor Veris U3, registradas em linhas contínuas que cobriram praticamente toda a extensão do talhão. Essa configuração resultou em uma resolução espacial detalhada, permitindo identificar variações internas do solo que dificilmente seriam detectadas por amostragens convencionais. Comparativamente, a

ISBN 978-65-990392-6-3

representatividade dessa base de dados é significativamente superior à coleta tradicional de solo, que apresenta baixa densidade amostral e maior custo operacional. Conforme destacado por Bottega et al. (2022), essa é uma das principais vantagens do uso de sensores de condutividade elétrica aparente em agricultura de precisão trazendo a possibilidade de mapear atributos estáveis do solo em grande detalhe, de forma rápida e com menor custo em relação às análises laboratoriais. Tal riqueza de informações favorece a caracterização da variabilidade espacial e fornece subsídios consistentes para a delimitação de zonas de manejo.

Figura 4 – Mapa temático dos pontos coletados pelo Veris.

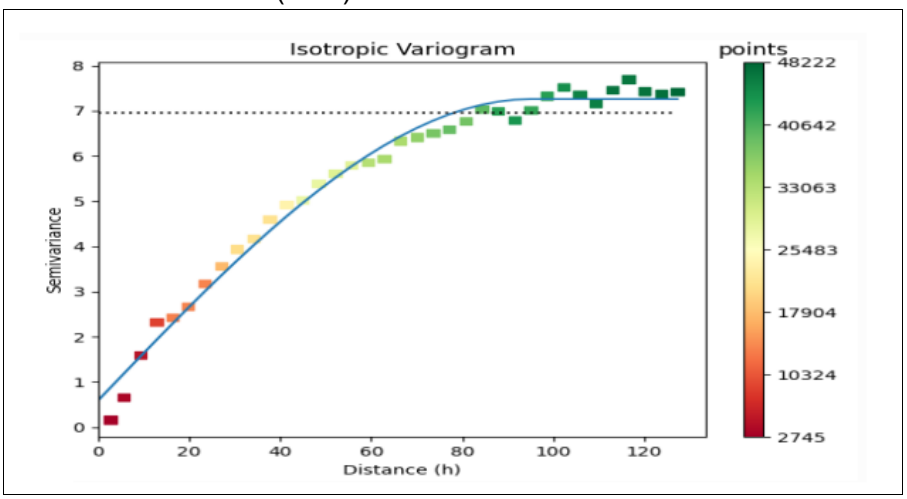


Fonte: Autores (2025)

O ajuste do semivariograma experimental (Figura 5) isotrópico da CEa do talhão foi realizado com o modelo esférico, que apresentou desempenho adequado em representar a estrutura de dependência espacial dos dados. Os parâmetros estimados foram: efeito pepita (C_0) = 0,598, patamar ($C_0 + C_1$) = 7,261 e alcance (a) = 95,262 m. O efeito pepita relativamente baixo indica que apenas uma pequena parcela da variabilidade não foi explicada pelo modelo, refletindo boa representatividade da estrutura espacial. O patamar próximo de 7,3 demonstra a estabilização da semivariância em distâncias superiores ao alcance, valor que confirma a existência de dependência espacial até aproximadamente 95 metros. O coeficiente de determinação do ajuste foi elevado (R^2 = 0,985), associado a um erro quadrático médio reduzido (RMSE = 2,405), evidenciando a adequação do modelo ajustado em relação ao variograma empírico.

ISBN 978-65-990392-6-3

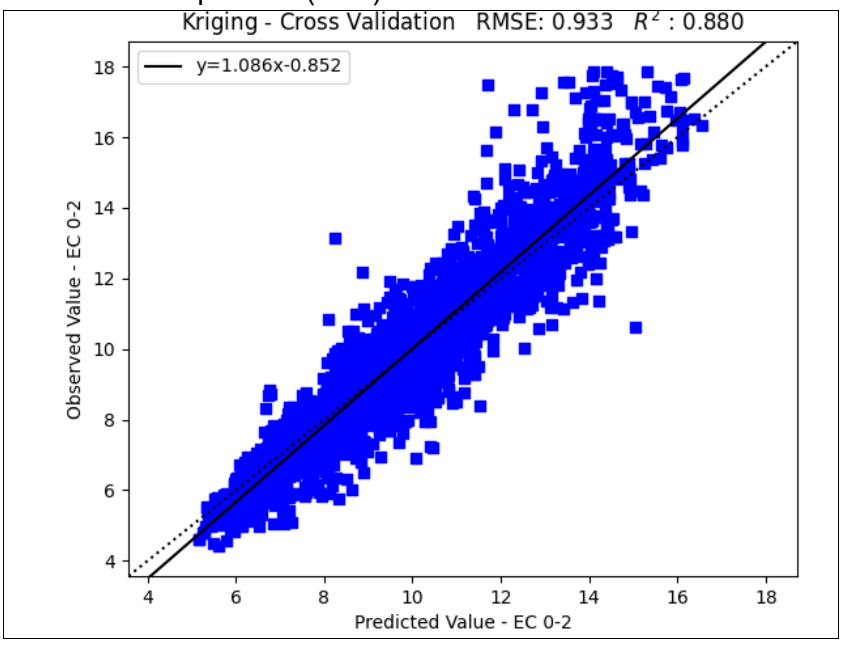
Figura 5 - Semivariograma isotrópico ajustado para a condutividade elétrica aparente (CEa) no talhão Erva Mate.



Fonte: Autores (2025)

Com base nesse semivariograma, procedeu-se à interpolação por krigagem ordinária, assegurando estimativas não tendenciosas e com variância mínima. Para verificar a qualidade preditiva do modelo, foi realizada a validação cruzada (Figura 6), na qual cada ponto amostral é estimado a partir dos demais. Os resultados evidenciaram forte correlação entre os valores observados e preditos (R^2 = 0,880), além de um erro quadrático médio (RMSE = 0,933) considerado baixo frente à amplitude da variável. A equação da reta de regressão obtida (y = 1,086x – 0,852) demonstrou tendência positiva e próxima da bissetriz, confirmando a consistência das estimativas.

Figura 6 - Validação cruzada da krigagem ordinária para a condutividade elétrica aparente (CEa) no talhão Erva Mate.



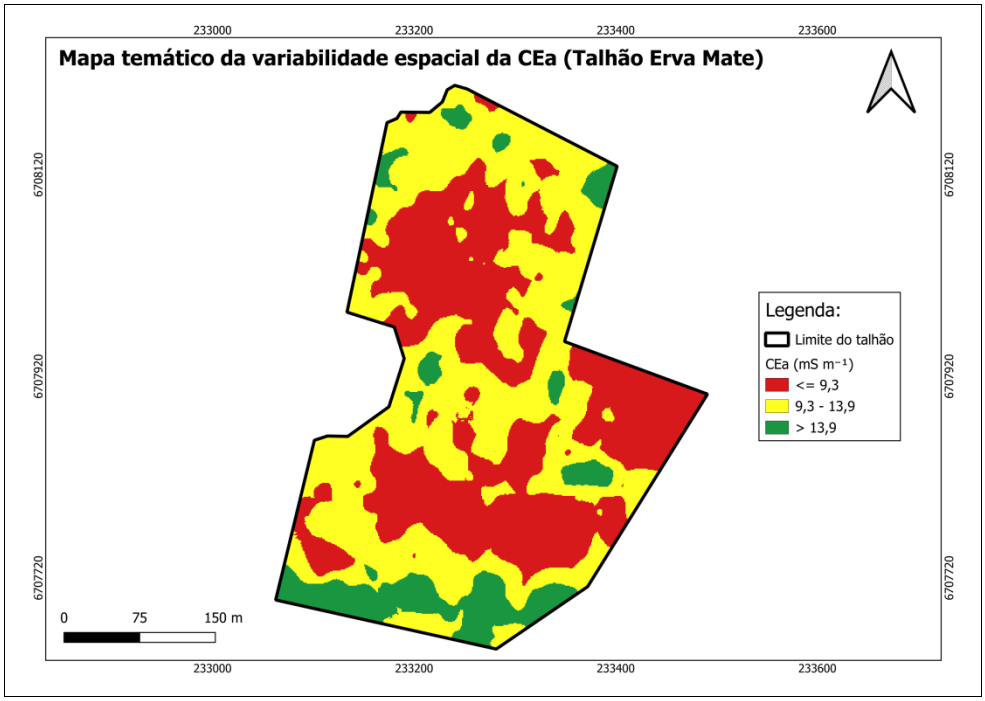
Fonte: Autores (2025)

Esses resultados comprovam que o mapa de CEa gerado pela krigagem não constitui uma extrapolação arbitrária, mas sim um produto de análises geoestatísticas consistentes, embasadas no ajuste adequado do semivariograma e validadas por métricas de acurácia amplamente aceitas na literatura (OLIVER et al.,2014).

O Mapa Temático da CEa (Figura 7) evidencia que a maior proporção do talhão apresenta valores de baixa condutividade elétrica aparente (≤ 9,3 mS m^{-1}), concentrados principalmente nas regiões norte, central e leste. Essas áreas coincidem com os pontos de menor teor de argila identificados no mapa textural, reforçando a presença de solos mais arenosos, caracterizados por menor capacidade de retenção de água e nutrientes e maior suscetibilidade à lixiviação.

Em contrapartida, áreas de condutividade intermediária (9,3–13,9 mS m^{-1}) e alta (>13,9 mS m^{-1}) foram observadas predominantemente na porção sul do talhão, além de pequenas manchas distribuídas em outras regiões, locais que também apresentaram maior teor de argila. Esse padrão confirma a relação direta entre CEa e textura do solo (CORWIN et al., 2005) e validada em condições brasileiras por Machado et al. (2006), evidenciando o potencial da CEa como indicador indireto para caracterização da variabilidade espacial em áreas agrícolas.

Figura 7 – Mapa temático para variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo.

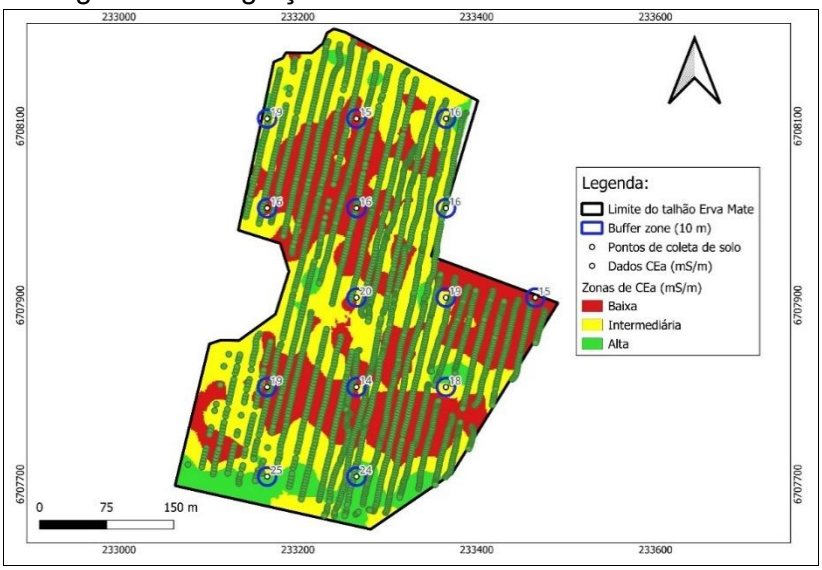


Fonte: Autores (2025)

O mapa temático das Buffer Zones (Figura 8) apresenta a integração dos dados de argila e CEa. Para cada ponto amostral de solo foi delimitada uma zona de influência com raio de 10 metros, dentro da qual foram calculadas as médias da CEa. Essa estratégia mostra-se fundamental em situações em que há diferença de densidade entre as variáveis, como neste caso em que a argila possui menor densidade amostral e a CEa apresenta maior densidade. O procedimento garante comparações mais consistentes e permite uma análise integrada da variabilidade espacial. Conforme discutem (MOLIN et al., 2011), a integração de variáveis em

diferentes escalas é essencial para a delimitação de zonas de manejo que representem de forma mais fiel a heterogeneidade do talhão.

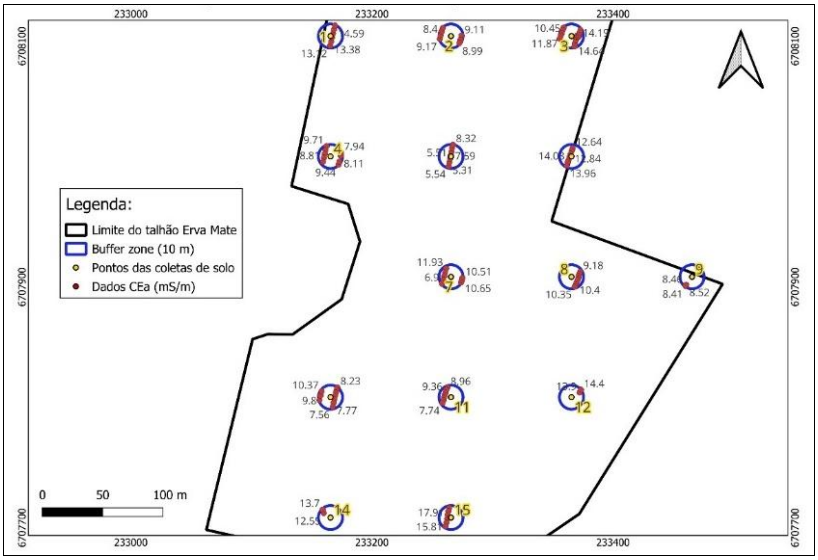
Figura 8 – Integração de todas as variáveis analisadas.



Fonte: Autores (2025)

Na distribuição dos valores de CEa por Buffer Zone (Figura 9), verifica-se que os valores médios de CEa seguem a mesma tendência observada para os teores de argila. Os pontos com menor teor de argila (<20%) apresentaram valores reduzidos de CEa, enquanto aqueles classificados como franco-arenosos (20–40% de argila) registraram valores intermediários a elevados. Como exemplo, destacam-se os pontos localizados na porção sul do talhão, com 24 e 25% de argila, que apresentaram CEa mais alta em comparação às demais áreas. Esse resultado reforça a associação direta entre os dois atributos, confirmando a relação positiva entre argila e CEa já relatada em diferentes condições edafoclimáticas por (CORWIN et al., 2005) e (PERALTA et al. 2013)

Figura 9 – Identificação da *buffer zones*.



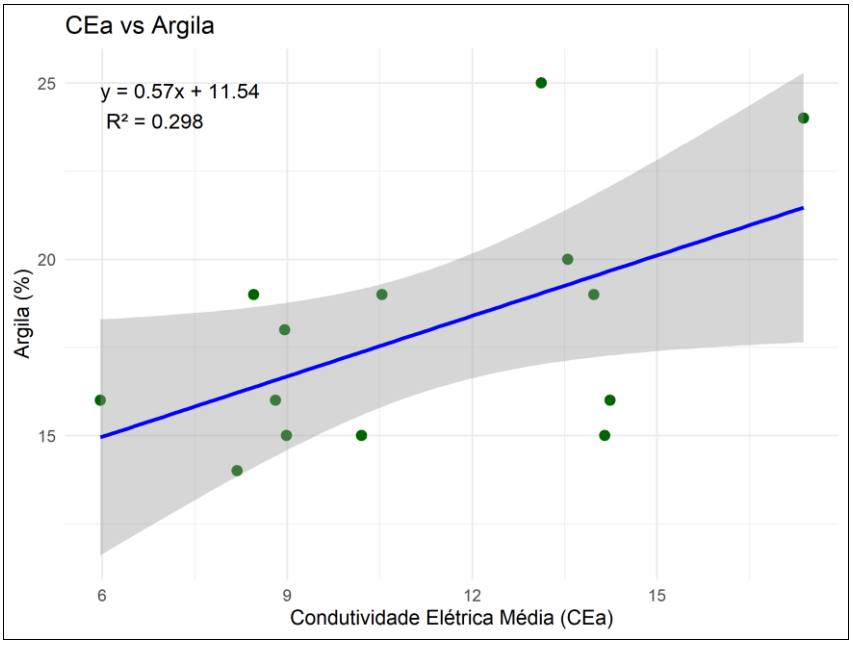
Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

A correlação entre os teores de argila e a condutividade elétrica aparente média (CEa), obtida por meio da criação de buffer zones de 10 metros ao redor de cada ponto amostral de solo, resultou em um coeficiente de Pearson de 0,5457, com p = 0,0435, indicando uma associação positiva moderada e estatisticamente significativa (p < 0,05) (Figura 10). A regressão linear ajustada evidenciou essa tendência positiva entre as variáveis, com um coeficiente de determinação R^2 = 0,298, o que indica que aproximadamente 29,8% da variação no teor de argila é explicada pela CEa. A faixa de confiança de 95% em torno da reta de regressão demonstra que, embora haja dispersão natural entre os pontos, o padrão geral da relação é consistente.

No entanto, é importante destacar que o número de observações utilizadas nesta análise foi relativamente pequeno (n = 14), o que reduz a robustez estatística do modelo e limita o poder inferencial da correlação. Amostragens com baixa densidade espacial tendem a aumentar a sensibilidade do modelo a variações locais e podem subestimar ou superestimar o coeficiente de determinação (R^2), especialmente em contextos com alta variabilidade natural dos atributos do solo.

Figura 10 – Correlação linear simples entre as variáveis condutividade elétrica aparente (CEa) e teor de argila (Argila).



Fonte: Autores (2025)

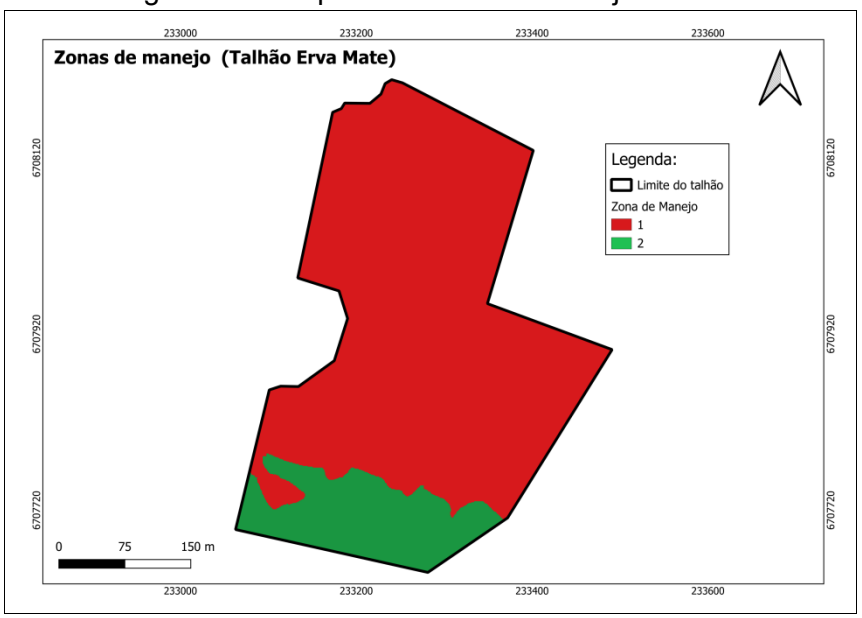
Do ponto de vista físico do solo, esse comportamento é compatível com o esperado, uma vez que solos mais argilosos tendem a apresentar maior condutividade elétrica devido à maior capacidade de retenção de água, maior densidade de cargas elétricas na superfície dos coloides e maior capacidade de troca de cátions (MACHADO, 2006; BOTTEGA, 2015). Contudo, a CEa é uma variável multifatorial, também influenciada por fatores como umidade instantânea no solo, teor de sais solúveis e matéria orgânica. Assim, embora a relação observada não seja forte do ponto de vista estatístico, ela é agronomicamente coerente e fornece indícios de que a CEa pode funcionar como um indicador indireto do teor de argila, especialmente se associada a outras variáveis auxiliares.

ISBN 978-65-990392-6-3

Dessa forma, a análise estatística reforça a tendência espacial observada e destaca o potencial da CEa como uma ferramenta complementar para apoiar a delimitação de zonas de manejo em áreas agrícolas, desde que utilizada em conjunto com dados físico-químicos do solo e em contextos com variabilidade espacial bem caracterizada.

A partir da integração dos mapas de teores de argila e da (CEa), foi elaborado o mapa de zonas de manejo do talhão (Figura 11). Esse produto cartográfico possibilitou a divisão da área em zonas homogêneas, refletindo a variabilidade espacial dos atributos do solo. A delimitação dessas zonas representa um passo fundamental para o planejamento de estratégias de manejo localizado, permitindo maior eficiência no uso de insumos e favorecendo a adoção de práticas agrícolas direcionadas às necessidades específicas de cada ambiente produtivo dentro do talhão.

Figura 11 – Mapa das zonas de manejo.



Fonte: Autores (2025)

4 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo utilizar a interpolação dos teores de argila e o mapeamento da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) para a criação de zonas de manejo em área agrícola. Esse objetivo foi alcançado por meio da integração das superfícies interpoladas, permitindo compreender a heterogeneidade do talhão e subsidiar práticas de manejo mais eficientes. A correlação positiva entre CEa e argila confirmou a viabilidade de uso conjunto desses atributos, evidenciando o potencial da CEa como indicador indireto de propriedades estáveis do solo.

As zonas de manejo resultantes configuram-se como ferramenta estratégica para a agricultura de precisão, possibilitando o ajuste da população de plantas e a aplicação de insumos em taxa variável. Essa abordagem contribui para a otimização

do uso de recursos, redução de custos e minimização de impactos ambientais, favorecendo sistemas agrícolas mais sustentáveis e economicamente viáveis.

REFERÊNCIAS

BOTTEGA, E.L. et al. Correlação entre condutividade elétrica aparente e atributos químicos e físicos de um Latossolo. **Comunicata Scientiae**, v.6, n.2, p.134-142, 2015.

BOTTEGA, E.L. et al. Site-Specific management zones delineation based on apparent soil electrical conductivity in two contrasting fields of Southern Brazil. **Agronomy**, v.12, p.1390. 2022.

BOTTEGA, E.L. et al. Mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo por diferentes equipamentos. **Revista Cultura Agronômica**, Ilha Solteira, v. 31, n. 1, p. 12-27, 2022.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture**. Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1–3, p. 11–43, 2005.

CQFS-RS/SC – COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2016.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

JOHNSON, C. K. et al. Site-specific management zones based upon soil electrical conductivity in a semiarid cropping system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 303–315, 2003.

MACHADO, P. L. O. A. et al. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 6, p. 1023-1031, 2006.

MOLIN, J. P. et al. Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 420-426, ago. 2005.

MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia na Agricultura**, v. 31, n. 1, p. 90-101, 2011.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, v. 113, p. 56-69, 2014.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 218-226, nov. 2013.

ISBN 978-65-990392-6-3

PEREIRA, G.W. et al. Smart-Map: An open-source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging. **Agronomy**, v.12, n.6: 1350, 2022.

SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. **ACM '68: Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference**,1968. p. 517–524.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 42

IMPACTO DA VELOCIDADE DE SEMEADURA NA PLANTABILIDADE DA SOJA

Impact of seeding speed on soybean plantability

Sabrina Tolotti Peruzzo[1]; Gabriel Isaque Kampff[1]; Luis Paulo Baldissera Shorr[1]; Laina Vitória Grasseli[1], Eliége Lampert[1], João Miguel Taufer Alves[1], Matheus Gnoatto[1]

[1] Centro de Ensino Superior Riograndense – CESURG, Sarandi, Rod. Leonel de Moura Brizola - BR-386, Km 138, s/n, 99560-000 - Beira Campo, Sarandi - RS, Brasil

RESUMO

Esperando sempre o melhor rendimento da cultura, torna-se de grande importância conhecer as melhores técnicas de condução e implantação da lavoura. Como o potencial de rendimento da soja é definido na implantação, conhecer a velocidade ideal de semeadura além de otimizar o processo também evita perdas por falhas ou competição de plantas. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar o impacto da velocidade de semeadura na qualidade da distribuição longitudinal de plantas. O experimento foi implantado em delineamento de blocos ao acaso com três tratamentos, sendo eles 3; 6; 9 Km.h^{-1} com quatro repetições. A cultivar utilizada foi a Brasmax TORQUE (57IX60RSF I2X). As variáveis analisadas para comparação das velocidades de semeadura foram: Germinação, Plantas duplas, Falhas, Número de Legumes, grãos/planta, Peso de mil sementes, Produtividade da cultura. A velocidade de semeadura influenciou na qualidade de semeadura, onde a velocidade de 3 Km.h^{-1} apresentou menor ocorrência de plantas duplas e teve a maior produtividade final de grãos.

Palavras-chave: *Glycine max* 1. Mecanização 2. Velocidade de semeadura 3.

ABSTRACT

With the expectation of achieving the best crop yield, it is crucial to understand the best planting and implementation techniques. Since soybean yield potential is determined at planting, knowing the ideal seeding speed not only optimizes the process but also prevents losses due to gaps or plant competition. Therefore, the objective of this study is to evaluate the impact of seeding speed on the quality of longitudinal plant distribution. The experiment was implemented in a randomized block design with three treatments: 3; 6; and 9 Km.h^{-1} , with four replicates. The cultivar used was Brasmax TORQUE (57IX60RSF I2X). The variables analyzed to compare seeding speeds were: Germination, Double Plants, Failures, Number of Legumes, Grains/plant, Thousand-Seed Weight, and Crop Yield. Seeding speed influenced seeding quality, with a speed of 3 Km.h^{-1} resulting in the lowest occurrence of double plants and the highest final grain yield.

Keywords: *Glycine max* 1. Mechanization 2. Sowing speed 3.

1 INTRODUÇÃO

A soja é uma cultura de grande destaque no cenário mundial. Isto se deve as características muito desejadas de seus grãos, que contém alta quantidade de

ISBN 978-65-990392-6-3

proteínas e de óleo, podendo serem utilizados para as mais variadas finalidades. Os principais produtos provenientes da soja são o farelo e o óleo, havendo grande destaque para os mesmos nos segmentos de exportação e alimentação animal (VAZ, 2020).

No Brasil, a soja inicialmente encontrou condições ideais de desenvolvimento na região sul, de onde iniciaram-se as pesquisas responsáveis pela expansão do cultivo para áreas como o centro-oeste, onde atualmente é registrada a maior produção do país. Atualmente a soja é um dos produtos destaque em exportações do país, mas além das receitas geradas, a soja foi responsável por uma série de mudanças no cenário agrícola do país, sendo com seu surgimento e expansão que foi implementada a agricultura comercial, houve aceleração da mecanização das lavouras, a tecnificação da implantação de outras culturas como o milho, modernização do sistema de transporte, impulsionamento da agroindústria nacional com a produção de suínos e aves, entre outros (DALL'AGNOL et al., 2021).

Considerando os múltiplos usos do grão e a demanda crescente pela produção devido ao aumento da população e consequentemente do consumo, torna-se imprescindível que sejam conhecidas e utilizadas técnicas que possibilitem o maior sucesso da lavoura, aumentando o potencial produtivo de uma área. A semeadura é um dos processos em que é definido o potencial produtivo da lavoura, sendo assim necessário evitar realizar a operação sem critérios, a fim de evitar perdas, tanto com falhas como com adensamento, além de outros recursos envolvidos como combustível, insumos, entre outros (BALBINOT JUNIOR et al., 2020).

Realizar a semeadura da soja ou de qualquer outra cultura em momentos considerados ideais, principalmente quando há a projeção de intempéries climáticas, por exemplo, pode significar o sucesso ou o fracasso de um cultivo. Para que o rápido desenvolvimento inicial ocorra é necessário que haja condições favoráveis à germinação e emergência das plântulas, como a presença de umidade e aeração do solo, o contato adequado entre semente e solo, além da utilização de sementes com elevada qualidade fisiológica e sanitária. Todavia, é fundamental que a operação de semeadura seja realizada de maneira que não traga prejuízos a estes fatores relacionados ao solo e a genética, proporcionando estabelecimento rápido e uniforme do estande de plantas (ALMEIDA et al., 2021).

No processo de semeadura são realizadas uma sequência de operações que precisam ser pensadas para que a implantação tenha sucesso, sendo eles, o corte da palhada, a abertura de sulcos, dosagem das sementes e fertilizantes, e a cobertura e compactação dos mesmos. Para que estas operações saiam da maneira correta, buscando-se uma boa uniformidade e emergência deve- se considerar a velocidade do conjunto trator semeadora durante a semeadura. Velocidades de deslocamento maiores ocasionam uma má distribuição das sementes, com mais incidência de espaços falhos, ao contrário do que é comumente observado em velocidades menores onde ocorre maior percentual de espaços normais entre plântulas, ressalta-se que isso depende do nível de tecnologia utilizada nos mecanismos dosadores e condutores de sementes, pois atualmente a qualidade da distribuição depende do nível de tecnologia embarcado em cada implemento. O aumento da velocidade acaba sobrecarregando os mecanismos dosadores podendo causar erro no preenchimento pelo acúmulo ou falta de sementes no alvéolo do mecanismo, alterando a distribuição das sementes, causando falhas ou adensamento de plântulas. Também, a semente pode ser

arremessada para fora da trajetória normal e cair fora do sulco, vindo a não germinar (SANTOS et al., 2017).

Desta forma, considerando a importância que a cultura da soja desempenha no setor do agronegócio mundial e em como o processo de semeadura está diretamente ligado ao sucesso das lavouras, gerando efeito na sua lucratividade ao produtor, este trabalho teve como objetivo é avaliar o impacto da velocidade de semeadura na qualidade da distribuição longitudinal de plantas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na safra de 2022/23, sendo implantado no dia 06 de dezembro de 2022, em uma área de lavoura localizada na linha Turvo, no município de Almirante Tamandaré do Sul/RS, possuindo as coordenadas 28° 4'36" S, 52°53'43" W, com altitude aproximada de 568 m ao nível do mar. O solo do local é caracterizado como Latossolo Vermelho Distrófico (EMBRAPA, 2006) e a sua condução é feita sob sistema de plantio direto na palha. O clima da região é caracterizado como subtropical úmido segundo Köppen, ou seja, com precipitação média anual elevada, em torno de 1.800 e 2.100 mm bem distribuídos ao longo do ano (ALVARES et al., 2013).

Os tratamentos avaliados foram 3 diferentes velocidades de semeadura para a cultura da soja, sendo estas velocidades 3 $Km.h^{-1}$; 6 $Km.h^{-1}$ e: 9 $Km.h^{-1}$. A cultivar utilizada foi BMX Torque I2X (57IX60), caracterizada como um material de ciclo precoce (5.7), adaptada para a região. Utilizou-se a população recomendada de 260.000 plantas/hectare, onde considerando o espaçamento entre linhas da semeadora de 0,50 metros, totaliza a densidade de semeadura de 13 sementes aptas por metro linear. A profundidade de semeadura foi de 4 cm, sendo igual para as diferentes velocidades testadas. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, com quatro repetições. As unidades experimentais foram compostas por 2 linhas de 2 m de comprimento, espaçadas 0,50 m entre linhas, totalizando 2 m^2.

Utilizou-se para semeadura um trator MF 4275, possuindo 75 cv e uma semeadora Kuhn PDM Plus 700 de 6 linhas, equipada com sulcador no sistema de distribuição de fertilizante e sistema mecânico horizontal de disco duplo na distribuição da semente.

A adubação utilizada foi de 150 Kg ha^{-1} de Cloreto de Potássio (KCL) distribuído em cobertura antes da semeadura, sendo utilizado no sulco de semeadura mais 280 Kg ha-1 do adubo formulado TOP PHÓS (03 – 28 – 00). O manejo de plantas daninhas, pragas e doenças foi igual para todos os tratamentos avaliados.

Após a semeadura, aos 14 dias após a emergência (DAE), foram avaliadas em 1 metro linear o número de plantas emergidas (EMERG), plantas duplas (DUPLAS) e falhas (FALHAS). Os espaçamentos foram classificados em aceitáveis, falhas e duplas, conforme metodologia descrita por Kurachi et al. (1989). A classificação pode ser observada na Tabela 1, em função da densidade de semeadura adotada (13 sementes/m) e do espaçamento desejado entre sementes (EDS) de 7,7 cm.

Quando as parcelas atingiram a maturidade fisiológica, realizou-se a colheita das 2 linhas centrais da parcela, totalizando 2 m^2. Foi avaliada a produtividade de grãos (PRODUTIVIDADE) e o peso de mil sementes (PMS) dados não apresentados. Em 12 plantas de cada repetição dos tratamentos, foram avaliados o número de

ISBN 978-65-990392-6-3

legumes com 1 grão (NLG1), número de legumes com 2 grãos (NLG2), número de legumes com 3 grãos (NLG3), número de legumes com 4 grãos (NLG4), número de legumes totais por planta (NLGP) e número de grãos totais por planta (NGP), dados não apresentados.

Tabela 1- Classificação do espaçamento entre sementes de soja pela metodologia descrita por Kurachi et al., 1989.

Classificação	Espaçamento EDS*		
Aceitáveis	3,8 cm	< EDS <	11,2 cm
Falhas	EDS >	11,2 cm	
Duplas	EDS <	3,8 cm	

* Espaçamento desejado entre sementes em função da densidade de semeadura adotada (EDS). EDS = 7,7 cm.

Fonte: Autores (2025)

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias submetidas ao teste de agrupamento de médias de Scott-Knott (SCOTT; KNOTT, 1974), considerando 5% de probabilidade de erro, utilizando o software estatístico SISVAR (FERREIRA, 2019).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da análise de variância mostra que houve diferença significativa da velocidade de semeadura apenas para as variáveis duplas e produtividade. Os coeficientes de variação (CV%) das duas variáveis com diferença estatística foram de 4,87% e 3,43%, indicando boa precisão experimental segundo classificação de Pimentel Gomes (2000). A obtenção do sucesso produtivo está ligada a correta dosagem e distribuição das sementes, devendo cumprir a quantidade recomenda do material a ser semeado e mantendo equidistância entre as plantas, evitando gerar falhas ou competição entre plantas duplas (BERTELLI et al., 2016).

Vários fatores podem ocasionar uma má qualidade do processo de semeadura. Sendo estes classificados em intrínsecos ao processo de semeadura ou extrínsecos. Dentre os fatores intrínsecos temos a velocidade de deslocamento, umidade do solo durante a operação, nível de tecnologia da máquina utilizada (dosador pneumático ou mecânico), pressão da roda compactadora e profundidade de semeadura, enquanto que os fatores extrínsecos são aqueles que não estão ligados a distribuição e deposição das sementes, mas influenciam na formação do estande final, como germinação e vigor da semente, ataque de pragas de solo na fase de plântulas, teor de água do solo necessário para que a semente germine, dentre outros (CINTRA et al., 2020).

Observando a variável EMERGÊNCIA (Tabela 2), não se encontrou diferença estatística entre as velocidades de semeadura estudadas. A profundidade de semeadura, deposição da semente no sulco, umidade do solo e qualidade da semente, fizeram com que as sementes distribuídas viessem a germinar e formar um bom estande de plantas. No entanto, o aumento da velocidade de semeadura mudou o arranjo das plantas na lavoura com a formação de espaços falhos e plantas duplas,

ISBN 978-65-990392-6-3

resultado este também verificado por Silva (2021) trabalhando com diferentes velocidades de semeadura da cultura da soja.

Para a variável DUPLAS verificou-se que a melhor distribuição das sementes na área ocorreu com a velocidade de semeadura de 3 Km.h^{-1}, apresentando uma média de 0,37 plantas duplas por metro linear. Conforme aumentou-se a velocidade de semeadura para 6 Km.h^{-1} e 9 Km.h^{-1}, foi possível verificar maior número de plantas duplas.

Segundo Carpes et al. (2017), o aumento da velocidade de semeadura e consequentemente aumento do número de sementes dosadas por segundo, causam espaçamentos fora do aceitável, sejam duplos ou falhas, uma vez que a maior velocidade de semeadura e a maior velocidade periférica do dosador podem intensificar o deslocamento horizontal da semente dentro do tubo condutor, elevando o número de rebotes dentro do mesmo, diminuindo o tempo de deslocamento até o solo, ocasionando a deposição em distância longitudinal falha ou dupla.

A ocorrência de plantas duplas também pode estar ligada a escolha do disco e anel incorretos para o tamanho da semente, ou ainda a semente ser de baixa qualidade e uniformidade (MARQUES FILHO et al., 2020). Visto que escolhidos de forma adequada o disco dosador e o anel, a ocorrência de plantas duplas será por consequência da velocidade de semeadura.

Outro fator que também tem influência na porcentagem de espaçamentos duplos é a densidade de semeadura, visto que quanto maior o número de sementes por metro for necessário se depositar, mais próximo será a distância entre as sementes depositadas, aumentando as chances de ocorrem plantas duplas (DIAS et al., 2009). Não há um espaçamento e/ou densidades ideais de soja para todos os ambientes e genótipos, por isso é importante observar a interação entre espaçamento e densidade de plantas dentro década condição de cultivo (CALISKAN et al., 2007). No entanto, este é um fator que deve ser pensado no momento da escolha do material, visto que hoje temos cultivares disponíveis em que frequentemente a densidade de plantas varia de 10 a 18 plantas por metro linear.

Tabela 2 – Médias para as variáveis emergência de plantas (EMERGÊNCIA), plantas duplas (DUPLAS) e falhas (FALHAS).

TRATAMENTOS	EMERG.	DUPLAS	FALHAS
	nº	nº	nº
3 Km.h^{-1}	12,50 a[1]	0,37 b	0,38 a
6 Km.h^{-1}	12,75 a	1,12 a	0,25 a
9 Km.h^{-1}	11,75 a	2,13 a	0,63 a
CV (%)*	4,05	4,87	27,66

[1]Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de agrupamento de médias de Scott & Knott, a 5% de probabilidade de erro.* Coeficiente de variação.

Fonte: Autores (2025)

A variável FALHAS, apesar de apresentar ausência de diferença significativa para as velocidades no presente trabalho, é um dos fatores mais comuns que vem a impactar negativamente na produtividade da soja. KLEIN et al. (2002) também não verificaram efeito da velocidade de trabalho no percentual de múltiplos e falhos para soja, ao estudarem velocidades de 3,6 à 10,7 Km.h^{-1}. Entretanto, predominam na

literatura resultados de diversos autores destacando que há um efeito da velocidade de semeadura sobre a ocorrência de espaçamentos falhos (DIAS et al., 2009; JASPER et al., 2011; CINTRA et al., 2020; CORREIA et al., 2020; MATOS et al., 2021).

Elevar a velocidade de semeadura exige um desempenho maior dos mecanismos dosadores e como consequência pode levar ao erro de preenchimento ou a falta de semente no alvéolo do mecanismo, ocasionando uma menor distribuição normal das sementes, gerando mais plantas falhas (SANTOS et al., 2017). Muito se evoluiu nos últimos anos com a criação de mecanismos dosadores mais modernos como os pneumáticos, permitindo semeaduras em velocidades maiores com uma precisão maior. No entanto, ainda predominam os dosadores convencionais.

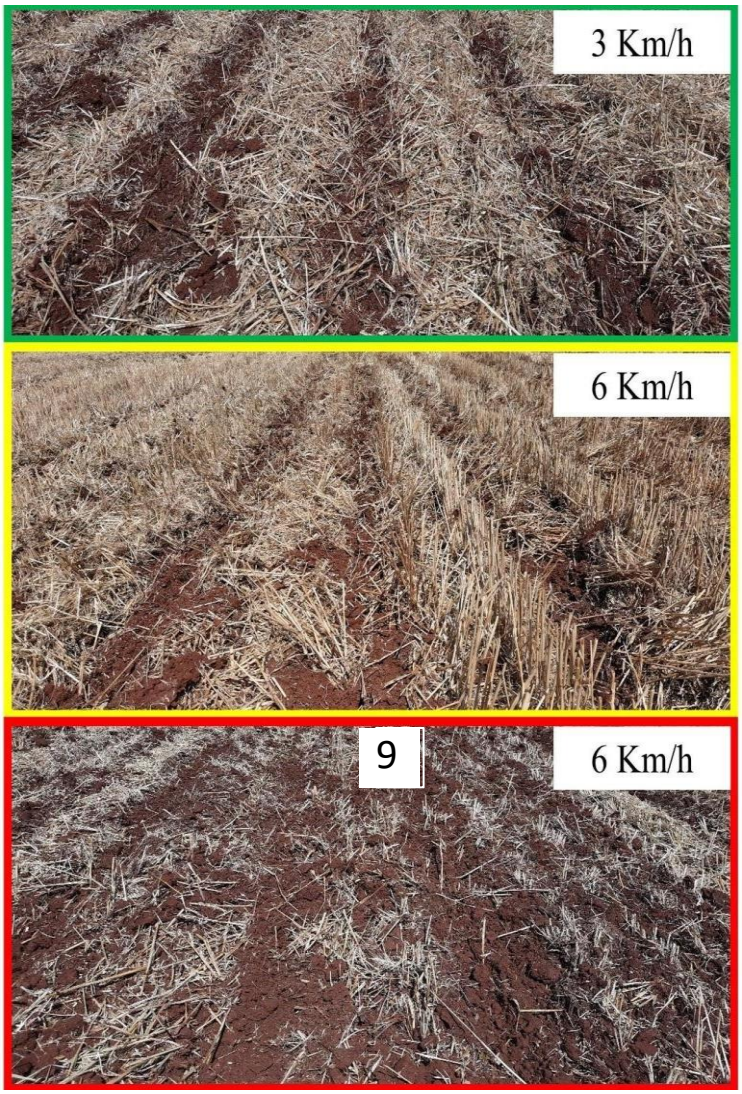
Correia et al. (2020) trabalhando com dosador convencional e dosador Titanium, destacam que a distribuição de espaçamentos aceitáveis no dosador Titanium é mais uniforme até a velocidade de 8,2 Km.h^{-1}, enquanto nos mecanismos dosadores convencionais com velocidades mais baixas já se verificou variações maiores. O dosador Titanium possui o mesmo princípio dos dosadores tradicionais, tendo agregado limitador de peso, três raspadores- organizadores de semente no alvéolo (Polyflow), um organizador de semente anti-pulo, fabricados com material maleável, além do ajetor com cerdas maleáveis (CORREIA et al., 2020). Este fato mostra que houve evolução podendo obter melhores resultados com velocidades maiores, mas mesmo assim novos mecanismos dosadores sofrem influência da velocidade de semeadura, devendo-se buscar o ponto de equilíbrio entre velocidade de semeadura e espaçamentos aceitáveis para cada dosador.

Outro fator que ocasiona falhas está ligado ao sulco de semeadura. Cortez et al. (2020) destacam que aumentos na velocidade operacional de semeadura implicam em menos tempo para a semeadora abrir o sulco e depositar a semente de forma adequada, fazendo com que as sementes saltem para fora do sulco, onde não terão as condições adequadas de germinação.

A qualidade do sulco de semeadura pode ser vista na Figura 4. Se observa um menor revolvimento do solo na velocidade de 3 Km.h^{-1} e 6 Km.h^{-1}. Já para a velocidade de semeadura de 9 Km.h^{-1}, houve um revolvimento maior do solo, sendo este jogado para a entrelinha. Este revolvimento mais acentuado, além de prejudicar a deposição adequada das sementes no sulco, também irá resultar em maior perda de solo e nutrientes por erosão.

A produtividade final de grãos (PRODUTIVIDADE) apresentou diferença significativa entre as velocidades de semeadura estudadas (Tabela 3). As maiores produtividades alcançadas foram para as velocidades de 3 Km.h^{-1} (2.630,20 kg ha^{-1}) e 6 Km.h^{-1} (2.544,56 kg ha^{-1}), sendo iguais estatisticamente. Já a menor produtividade observada foi para a velocidade de 9 Km.h^{-1} com 2.506,22 kg ha^{-1}, totalizando uma diferença de 124 kg ha^{-1} a menos que a velocidade de 3 Km.h^{-1} . Este resultado corrobora com os encontrados por Reynaldo (2016), Damasceno (2017) e Matos et al. (2021), que também encontraram redução na produtividade de grãos com o aumento da velocidade de semeadura.

Figura 1 – Qualidade da semeadura nas velocidades de 3, 6 e 9 Km.h^{-1} .



Fonte: Autores (2025)

Para atingir o máximo potencial produtivo, o arranjo espacial correto das plantas na lavoura é um fator primordial para minimizar a competição intraespecífica e maximizar o aproveitamento dos recursos do meio pelas plantas (BASSO et al., 2016). Por exemplo plantas duplas ocasionam competição por nutrientes e luz uma vez que a proximidade gera condições de sombreamento, pela sobreposição de folhas, fazendo com que a planta destine recursos para crescimento em extensão em detrimento de destinar para componentes produtivos (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Por outro lado, plantas falhas fazem com que se tenha um estande de plantas baixo. A cultura da soja possui uma alta plasticidade, apresentando uma compensação das falhas no estande através da maior emissão de ramos laterais e maior produção de legumes total por planta. No entanto, Basso et al. (2016) destacam que esse efeito compensatório varia entre cultivares e apresenta um limite, onde para falhas com espaçamento superiores a 56 cm houve perdas em produtividade. Outro ponto destacado por Vazquez et al. (2008) é de que aderir a populações de plantas abaixo

da recomendação favorece o desenvolvimento de plantas daninhas, plantas de estatura baixa e ramificada, fatores estes relacionados com decréscimos de produtividade.

Tabela 3 – Média para a variável produtividade (PROD).

TRATAMENTOS	PRODUTIVIDADE Kg ha^{-1}	
3 Km.h^{-1}	2.630,20	a*
6 Km.h^{-1}	2.544,56	a
9 Km.h^{-1}	2.506,22	b
CV (%)	3,43	

*Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de agrupamento de médias de Scott & Knott, a 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autores (2025)

Nesse sentido, Tourino et al. (2002) enfatizam que a maior precisão na deposição das sementes na linha de semeadura é de extrema importância quando se busca o aumento da produtividade.

Pensando na viabilidade econômica do cultivo da soja, aumentar a velocidade de semeadura de 3 Km.h^{-1} para 6 Km.h^{-1} reduz a produtividade em 1,43 sacas/hectare, o que corresponde a um valor de R$ 197,34 por hectare que o produtor deixa de arrecadar, considerando um valor médio de R$ 138,00 a saca de 60 kg (Tabela 4). Já para a velocidade de 9 Km.h^{-1} , a redução é maior, sendo de 2,06 sacas/hectare e o prejuízo de R$ 325,68.

Tabela 4 – Análise econômica da utilização de diferentes velocidades de semeaduras.

TRATAMENTOS	PRODUTIVIDADE	DIFERENÇA	
	SACAS. ha^{-1}	SACAS. ha^{-1}	R$
3 Km.h^{-1}	43,83	-	-
6 Km.h^{-1}	42,40	-1,43	-197,34
9 Km.h^{-1}	41,47	-2,06	-325,68
Valor da saca (60 Kg)			138,00

Fonte: Autores (2025)

Atualmente as janelas de implantação das culturas estão cada vez mais apertadas seja por condições climáticas ou por extensão das áreas cultivadas, levando o produtor a incrementar a velocidade das operações, o que no caso da semeadura, consequentemente tem acarretado em prejuízo.

4 CONCLUSÃO

Aumentar a velocidade da operação de semeadura da cultura da soja de 3 Km.h^{-1}para 6 e 9 Km.h^{-1}, reduziu a qualidade do estabelecimento do estande de plantas pela ocorrência de plantas duplas e afetou negativamente a produtividade final de grãos, trazendo prejuízos econômicos.

REFERÊNCIAS

ALVARES, A.C.; STAPE J.L.; SENTELHAS P.C.; MORAES GONCALVES J.L.; SPAROVEK G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2013.

BALBINOT JUNIOR, Alvadi Antonio, et al. Capítulo 4: Instalação da lavoura. In: SEIXAS, Claudine Dinali Santos... [et al.] editores técnicos. **Tecnologias de Produção de Soja** – Londrina: Embrapa Soja, 2020.

BASSO, C. J.; MURARO, D. S.; AGUIAR, A. C. M.; LIRA, M. Resposta da soja frente a falhas na distribuição de sementes. **Revista Cultivando o Saber**, v. 9, n. 4, p. 39-48, 2016.

BERTELLI, G. A.; JADOSKI, S. O.; DOLATO, M. L.; RAMPIM, L.; MAGGI, M. F. Desempenho da plantabilidade de semeadoras pneumática na implantação da cultura da soja no cerrado piauiense - Brasil. **Applied Research & Agrotechnology**, Guarapuava, v.9, n.1, p.91-103, 2016.

CALISKAN S, ARSLAN M, UREMIS I, CALISKAN ME. The effects of row spacing on yield and yield components of full season and double cropped soybean. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 31, n.3, p.147--154, 2007.

CARPES, D. P.; ALONÇO, A. S.; ROSSATO, F. P.; VEIT, A. A.; SOUZA, L. B.; FRENCETTO, T. R. Effect of different conductor tubes on the longitudinal distribution of corn seeds. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 9, p.657-662, 2017.

CINTRA, P. H. M.; COMPAGNOM, A. M.; ARRIEL, F. H.; VENTURA, G. S.; SANTOS, M. L.; NETO, A. M. P. Variabilidade espacial e qualidade de semeadura de soja. **Revista Brazilian Applied Science Reviw**, Curitiba/PR, v. 4, n. 3, p. 1206-1221, 2020.

CORREIA, T. P. S.; LOPES, A. G. C.; FAGGION, F.; SILVA, P. R. AL.; SOUSA, S. F. G. Semeadura de soja em função de mecanismos dosadores e velocidade operacional. **Revista Engenharia Agrícola**, Botucatu/SP, v. 35, n. 2, p. 190-198, 2020.

CORTEZ, J.W.; ANGHINONI, M.; ARCOVERDE, S.N.S. Seed metering mechanisms and tractor-seeder forward speed on corn agronomic components. **Engenharia Agrícola**, v.40, n.1, p.61-68, 2020.

DALL'AGNOL, Amélio; et al. **Importância socioeconômica da soja**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pre-producao/socioeconomia/importancia-socioeconomica-da-soja>. Conteúdo migrado na íntegra em: 08/12/2021. Acesso em: maio de 2023.

DAMASCENO, A. F. **Sistema dosador de sementes e velocidade de operação na semeadura direta da soja**. Dissertação apresentada a Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinarias – UNESP, Jaboticabal/SP, 2017. Disponível em: < https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/862b8f23-d3c4-461b-87c8-d410485c2a04/content>. Acesso em: 09 de novembro de 2023.

DIAS, V. O.; ALONÇO, A. S.; BAUMHARDT, U. B.; BONOTTO, G. J. Distribuição de sementes de milho e soja em função da velocidade e densidade de semeadura. **Ciência Rural**, Santa Maria/RS, v. 39, n. 6, p. 1721-1728, 2009.

EMBRAPA. **História da soja**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/historia>. Acesso em: abril de 2023.

FERREIRA, D.F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

JASPER, R.; JASPER, M.; ASSUMPÇÃO, P.S.M.; ROCIL, J.; GARCIA, L.C. Velocidade de semeadura da soja. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.1, p.102-110, 2011.

KLEIN, V.A. et al. Efeito da velocidade na semeadura direta de soja. **Engenharia Agrícola**, v.22, n.1, p.75-82, 2002.

MARQUES FILHO, A.C.; RUSCONI, L.H.M.; SILVA, P. R. A. Plantabilidade e distribuição longitudinal de sementes de algodão com diferentes conjuntos disco-anel em dosador mecânico. **Energia na Agricultura**, Botucatu/SP, v. 35, n.4, p. 476-483, 2020.

MARTIN, T. N.; et al. Plantabilidade E Velocidade De Semeadura Na Cultura Da Soja. In: MARTIN, Thomas Newton [et al.]. **Tecnologias Aplicadas para o Manejo Rentável e Eficiente da Cultura da Soja** / Santa Maria: Editora GR, 2022. 528 p.

MATOS, E. S.; MANTOVANI, A.; NASCIMENTO, J. M.; ARCORVERDE, S. N. S.; SECRETTI, M. L. Mecanismos sulcadores e velocidades de semeadura na plantabilidade e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 11, n. 1, p. 36- 42, 2021.

REYNALDO, E.F.; MACHADO, T.M.; TAUBINGER, L.; QUADROS, D. Influência da velocidade de deslocamento na distribuição de sementes e produtividade de soja. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.24, n.1, p.63-67, 2016.

SANTOS, T.D.; MEERT, L.; BORGHI, W.A.; SILVA, P.S.; FIGUEIREDO, A.S.T. Desenvolvimento inicial de plantas de soja e qualidade de semeadura em função da velocidade de deslocamento da semeadora e textura do solo. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v.10, p.97-103, 2017.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics. Raleigh**, v.30, n.3, p.507-512, 1974.

SILVA, J.P.N. **Influência da velocidade de semeadura em soja.** Trabalho de conclusão de curso, apresentado no Curso de Graduação em Agronomia da Faculdade da Amazônia (FAMA). Vilhena/AM, 2021. Disponível em: <http://repositorio.fama-ro.com.br/bitstream/123456789/209/1/TCC%20final%20Jo%c3%a3o%20Pedro%2007-07- 21%20AGRO.pdf>. Acesso em: 05 de novembro de 2023.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 4 ed. Porto Alegre: Artmed, 848 p., 2009.

TOURINO, C. C. M.; REZENDE, M. P.; SALVADOR, N. Espaçamento, densidade e uniformidade de semeadura na produtividade e características agronômicas da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol.37, n°.8, Brasília Ago. 2002.

VASQUEZ, G. H.; CARVALHO, N. M.; BORBA, M. M. Z. Effects of plant population reductions on yield and seed physiological qualyti of soybeans. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 30, n. 2, p. 1-11, 2008.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 43

EFEITOS AGRONÔMICOS E ECONÔMICOS DA APLICAÇÃO EM TAXA VARIÁVEL EM COMPARAÇÃO À TAXA FIXA DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES

Agronomic and Economic Effects of Variable-Rate versus Fixed-Rate Application of Soil Amendments and Fertilizers

André Müllich[1]; Luiz Felipe Silveira Pavão[1]; Ivan Carlos Maldaner[1]; Marcelo Silveira de Farias[1]; Luciano Zucuni Pes [1]; Jaqueline Sgarbossa[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima nº 1000, 97105-900, Santa Maria – RS, Brasil, andre.mullich@hotmail.com, felipepavao14@gmail.com, ivan.maldaner@ufsm.br , marcelo.farias@ufsm.br, lucianopes@politecnico.ufsm.br, sgarbossa.jaqueline@ufsm.br

RESUMO

A aplicação de insumos em taxa variável é uma prática essencial da Agricultura de Precisão, permitindo ajustar as doses conforme a variabilidade espacial do solo. Este estudo foi realizado em uma lavoura de 87,8 ha em Santa Bárbara do Sul, RS, utilizando grade amostral de 120 m e interpolação por spline para geração dos mapas de prescrição. Foram comparadas as estratégias de aplicação em taxa fixa e variável para calagem, fósforo (MAP) e potássio (KCl). Os resultados mostraram que, embora as quantidades totais de calcário aplicadas fossem semelhantes, a taxa variável distribuiu as doses de forma mais eficiente, corrigindo adequadamente as áreas do talhão. Para o fósforo, a taxa variável proporcionou redução no uso do insumo e economia direta de aproximadamente R$ 10.900,00 em relação à taxa fixa. No potássio, o manejo variável identificou a necessidade de 3 t de KCl, suprindo regiões deficientes que seriam negligenciadas pela taxa fixa. Conclui-se que a taxa variável promove eficiência agronômica, sustentabilidade ambiental e ganhos econômicos expressivos, configurando-se como alternativa viável ao manejo convencional.

Palavras-chave: Eficiência Agronômica. Análise Econômica. Manejo do Solo.

ABSTRACT

Variable rate application of inputs is an essential practice in Precision Agriculture, allowing fertilizer doses to be adjusted according to soil spatial variability. This study was conducted in an 87.8 ha field in Santa Bárbara do Sul, RS, Brazil, using a 120 m sampling grid and spline interpolation to generate prescription maps. Fixed-rate and variable-rate application strategies were compared for liming, phosphorus (MAP), and potassium (KCl). Results showed that although the total amount of lime applied was similar, the variable-rate strategy distributed doses more efficiently, ensuring proper soil acidity correction. For phosphorus, variable rate reduced input use and generated direct savings of about R$ 10,900 compared to the fixed-rate method. For potassium, the variable strategy identified the need for 3 t of KCl, supplying deficient areas that would otherwise remain unfertilized. It is concluded that variable rate application improves agronomic efficiency, enhances environmental sustainability, and delivers significant economic gains, proving to be a viable alternative to conventional management.

Keywords: Agronomic Efficiency. Economic Analysis. Soil Management.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura tradicional, amplamente adotada por vários séculos, estabelece-se na aplicação uniforme de fertilizantes e corretivos ao longo de toda a superfície cultivada, independentemente das características heterogêneas do solo. Essa prática uniforme nem sempre satisfaz as demandas reais das plantas, resultando em subdosagem que compromete a produtividade em algumas áreas ou sobredosagem que implica desperdício de insumos e possíveis impactos ambientais (SHARMA et al., 2025). Com o avanço tecnológico, surgiu a chamada Agricultura de Precisão (AP), estratégia que integra sistemas GNSS, sensores e análise geoespacial para adequar as doses de insumos às variações reais dentro dos talhões (MONTEIRO et al., 2021).

Uma das principais ferramentas da AP é a Aplicação em Taxa Variável (VRT), consagrada por aplicar fertilizantes na proporção exata em cada local, diminuindo o uso desnecessário de insumos e promovendo maior eficiência operacional e econômica (SPÄTI et al., 2021). Diversas revisões recentes reforçam os ganhos dessa abordagem, tais como: redução de impactos ambientais como lixiviação de nitrato e escoamento de fósforo, sem comprometer a produtividade (BAHMUTSKY et al., 2024), economia de custos de até 15 % em fertilizantes comparado ao método uniforme, com benefícios também para a saúde do solo (FARMONAUT, 2025) e sustentabilidade ambiental, preservando recursos naturais e reduzindo a contaminação de águas (GEOPARD, 2023).

Particularmente no Brasil, a AP tem se consolidado desde os anos 1990, com crescente produção científica que destaca seu potencial técnico, econômico e ambiental (CHERUBIN et al., 2022). A aplicação de VRT em culturas de alto uso de fertilizantes, típicas de solos ácidos como os dos Cerrados, representa estratégia altamente promissora para racionalização de insumos, apesar dos desafios associados à adoção tecnológica (GRIFFIN, 2005).

No cerne desse debate, torna-se evidente que a variabilidade espacial interna dos solos conduz tanto a perdas quanto a ineficiências quando se emprega uma única dose média por talhão. A Agricultura de Precisão, por meio de aplicação em taxa variável, apresenta-se como paradigma alinhado aos princípios da nutrição de precisão, destinada a otimizar a dose, o local, o momento e a fonte dos nutrientes seguindo os preceitos da gestão 4R, com ganhos econômicos e redução dos impactos ambientais (NUTRIENT MANAGEMENT, 2025).

Este estudo tem como objetivo avaliar os efeitos da aplicação de fertilizantes utilizando taxa fixa versus taxa variável, por meio de análises de solo georreferenciadas. Espera-se demonstrar, por meio de mapas de calagem, fósforo e potássio, e dos respectivos dados quantitativos, as vantagens agronômicas, econômicas e ambientais da abordagem baseada na AP em relação ao método convencional, em um talhão de 87,4 ha.

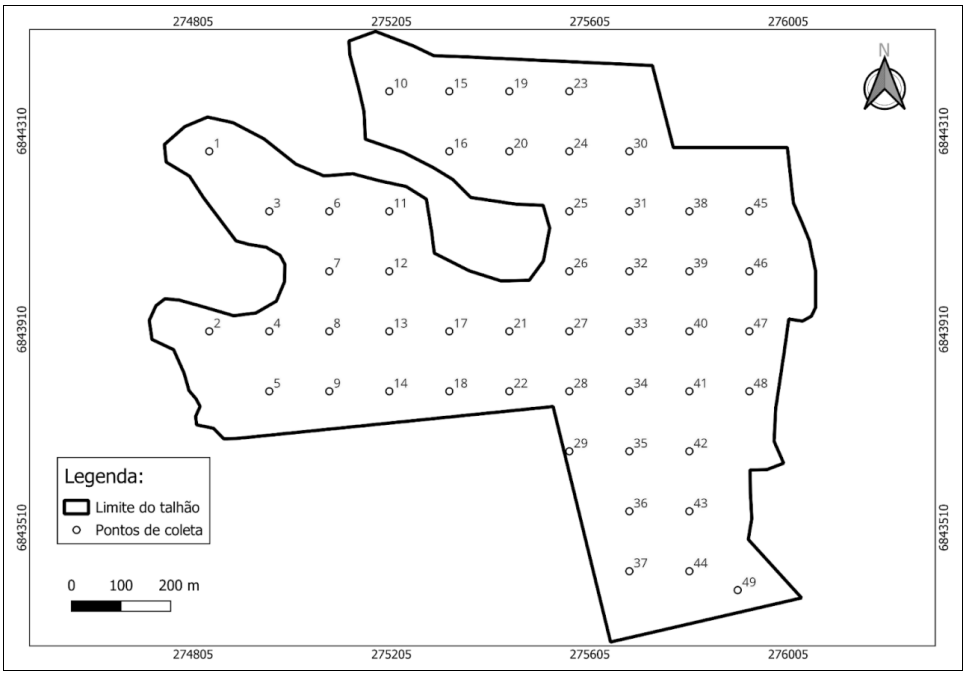
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em uma lavoura comercial de aproximadamente 87,8 ha localizada em Santa Bárbara do Sul, no Rio Grande do Sul (Figura 1), município

situado a aproximadamente 511 m de altitude e pertencente a uma região de clima subtropical úmido, classificado como Cfa segundo o sistema de Köppen-Geiger (KÖPPEN, 1936; KOTTEK et al., 2006; ALVARES et al., 2013), caracterizado por verões moderadamente quentes e distribuição pluviométrica relativamente uniforme ao longo do ano.

Figura 1 - Polígono com o limite do talhão analisado e os pontos de coleta.



Fonte: Autores (2025)

O solo de Santa Bárbara do Sul é classificado nos quatro primeiros níveis categóricos do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos como Latossolo Vermelho Distrófico. Trata-se de um solo amplamente representativo da região do Planalto Médio, associado à Unidade Passo Fundo, muito comum em áreas agrícolas do norte do Rio Grande do Sul. Em termos gerais, esses solos são caracterizados por serem profundos, muitas vezes ultrapassando 250 cm de espessura, bem drenados, bastante porosos e de coloração avermelhada, reflexo do elevado grau de intemperismo e da presença de óxidos de ferro em sua composição. A textura varia de média a argilosa conforme os horizontes, e quimicamente são solos ácidos, com baixa saturação por bases e reduzida fertilidade natural. Essa combinação de características exige práticas de manejo adequadas, como a calagem e a adubação, para corrigir a acidez e fornecer os nutrientes necessários ao bom desenvolvimento das culturas, o que explica a relevância desta pesquisa sobre o uso de taxa fixa e taxa variável na aplicação de insumos.

2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados

Para caracterizar a variabilidade espacial do solo, foi utilizada uma malha amostral regular com espaçamento de 120 m entre os pontos. As amostras foram coletadas na camada superficial de 0 a 20 cm de profundidade. Cada ponto amostral

consistiu em uma amostra composta por cinco subamostras: uma amostra central e quatro subamostras dispostas a 10 m de distância da central, seguindo orientação para representar adequadamente a microvariabilidade local. Após a coleta, ocorrida nos dias 23 e 24 de julho de 2024, as amostras foram encaminhadas para análise laboratorial, e os resultados foram utilizados para construir mapas de diagnóstico dos atributos do solo.

A interpolação espacial dos dados coletados foi realizada por meio do método de spline conforme Duchon (1977) expresso na Equação 1, que permite gerar superfícies contínuas a partir dos valores pontuais, sendo particularmente recomendável para captar variabilidade suave e contínua nas características do solo.

$$Z(x,y) = T(x,y) + \sum_{j=1}^{n} \lambda_j R(r_j) \quad (1)$$

$Z(x,y)$: Valor interpolado (ou suavizado) na coordenada (x,y).

$T(x,y)$: Termo polinomial (geralmente linear ou constante) que garante que o sistema seja bem comportado.

$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j R(r_j)$: Combinação linear de funções de base radial.

λ_j: Pesos ou coeficientes a serem determinados.

$R(r_j)$: Função de base radial aplicada à distância r_j.

r_j: Distância entre o ponto (x,y) e o ponto de controle j.

O procedimento de interpolação foi configurado com um tamanho de célula de 1 m, o alcance de busca máximo de 120 m, e número mínimo de 16 e máximo de 20 pontos dentro da distância de busca, além de regularização ajustada em 0,000100. Essas configurações, que foram empregadas com base nos parâmetros operacionais de *softwares* de geoprocessamento, permitiram uma interpolação detalhada e fiel aos padrões espaciais observados nos dados originais.

Além da análise agronômica dos mapas de prescrição em taxa fixa e variável, foi realizada uma avaliação econômica para estimar o impacto financeiro das diferentes estratégias de aplicação. Para isso, foram consultadas cotações médias de mercado referentes aos principais insumos utilizados no estudo, considerando o preço por tonelada de calcário agrícola, de fontes fosfatadas (MAP) e de fontes potássicas (KCl). Os valores médios obtidos (Tabela 1) foram utilizados como referência para o cálculo do custo total das aplicações em cada cenário, permitindo comparar diretamente o efeito econômico da adoção da taxa fixa em relação à taxa variável. Essa abordagem complementa a análise técnica, trazendo subsídios para a avaliação da viabilidade prática da AP no manejo da fertilidade do solo.

Tabela 1 - Estimativas de preços médios por tonelada

Insumo	Faixa Estimada (R$)	Valor Médio Aprox. (R$ t^{-1})
Calcário	80,00 – 150,00	110,00
MAP (Fósforo)	4.000,00 – 4.200,00	4.100,00
KCl (Potássio)	2.000,00 – 2.100,00	2.050,00

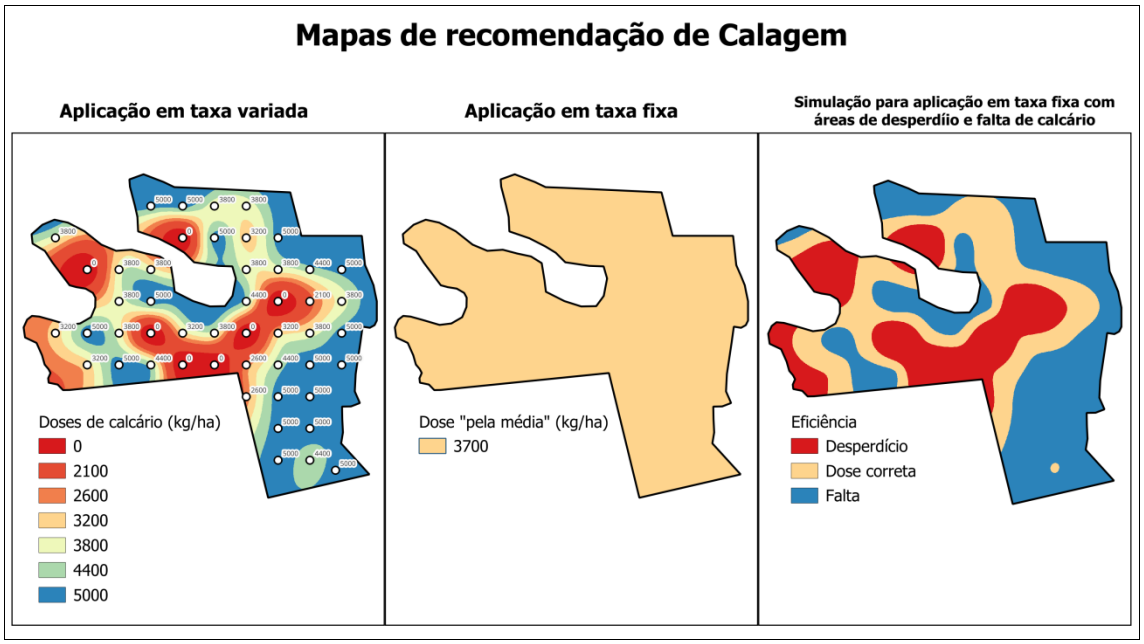
Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 observa-se o mapa de recomendação de calagem obtido por aplicação em taxa variável, o mapa correspondente à aplicação em taxa fixa e a simulação de eficiência dessa aplicação. A dose variável de calcário apresentou uma amplitude expressiva, variando de 0 a 5000 kg ha⁻¹, com média de 2393 kg ha⁻¹. Esse resultado evidencia a heterogeneidade química do solo dentro do talhão, confirmando a necessidade de ajuste localizado das doses. Por outro lado, a simulação em taxa fixa definiu uma dose única de 3700 kg ha⁻¹, valor obtido a partir da média geral das análises, desconsiderando a variabilidade espacial existente.

Figura 2 – Mapas de recomendação de calagem em taxa variável (esquerda), taxa fixa (centro) e simulação de eficiência da taxa fixa (direita).



Fonte: Autores (2025)

Tabela 2 – Quantidade e distribuição das doses em VRT de calcário por área

Doses (kg ha^{-1})	Área (ha)	Quantidade (t)
0	6,11	0
2.100	8,99	18,89
2.600	6,71	17,46
3.200	8,39	26,86
3.800	11,95	45,42
4.400	14,55	64,03
5.000	31,06	155,33

Fonte: Autores (2025)

A análise comparativa mostra que a aplicação em taxa fixa resultaria em um consumo de 324,86 toneladas de calcário para a área de 87,8 hectares, valor muito próximo ao total demandado pela aplicação em taxa variável, de 328 toneladas. Apesar da proximidade nos totais, o impacto sobre a distribuição espacial das doses é

ISBN 978-65-990392-6-3

bastante distinto. Com a taxa fixa, apenas 27% do talhão receberia a quantidade adequada de calcário, enquanto 44% da área receberia doses superiores às necessárias e 29% ficariam subdosadas. Essa discrepância demonstra que a simples adoção da média do talhão não garante eficiência agronômica, podendo comprometer tanto a neutralização da acidez quanto a sustentabilidade do manejo.

O desperdício de insumo em quase metade da área, evidenciado pela taxa fixa, representa não apenas um custo adicional desnecessário, mas também risco ambiental associado à aplicação excessiva de corretivos. Ao mesmo tempo, as áreas subcorrigidas permaneceriam com limitações químicas ao desenvolvimento radicular e absorção de nutrientes, reduzindo a eficiência de uso dos fertilizantes aplicados posteriormente. Esses resultados corroboram estudos que apontam que a calagem uniforme pode gerar zonas de supercalagem e subcalagem no mesmo talhão, comprometendo a produtividade e aumentando os riscos ambientais (CHERUBIN et al., 2022; MONTEIRO et al., 2021).

Já, a aplicação em taxa variável permitiu um ajuste mais adequado, atendendo à real necessidade de cada porção do talhão, o que assegura melhor correção da acidez e, consequentemente, maior eficiência no uso de nutrientes. Assim, embora a quantidade total de calcário utilizada seja praticamente equivalente, a distribuição espacial diferenciada garante maior sustentabilidade e maior retorno econômico a longo prazo.

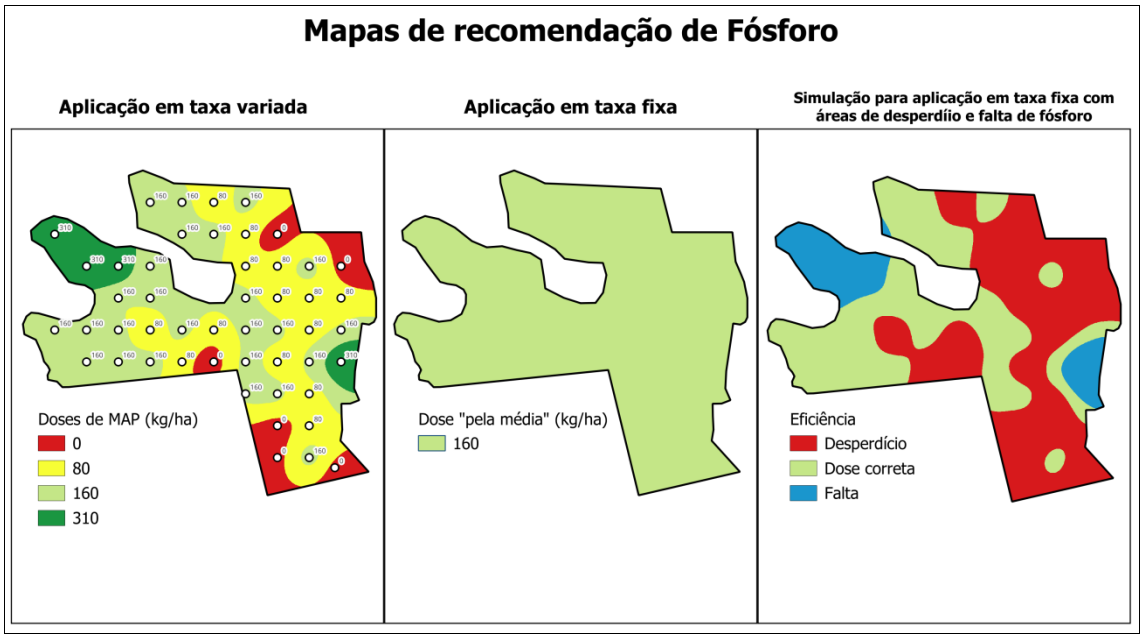
Considerando um valor médio de R$ 110,00 por tonelada, o custo da aplicação em taxa fixa seria de aproximadamente R$ 35.734,60, referente à utilização de 324,86 toneladas. Já a aplicação em taxa variável demandaria 328 toneladas, com custo de R$ 36.080,00. Embora a diferença total seja de apenas R$ 345,40 a mais para a taxa variável, o benefício agronômico é expressivo, pois a distribuição localizada garante que cada região do talhão receba a dose correta, evitando áreas super ou subcorrigidas. Dessa forma, o pequeno acréscimo financeiro representa um investimento na eficiência da correção da acidez, que se reflete diretamente na produtividade da lavoura.

Na Figura 3 estão representados os mapas de recomendação de fósforo, comparando a aplicação em taxa variável, a aplicação em taxa fixa e a simulação de eficiência desta última. A dose de fósforo em taxa variável apresentou amplitude de 40 a 310 kg ha^{-1} de MAP, com média de 160 kg ha^{-1}. Essa variação demonstra que, assim como na calagem, o talhão apresenta elevada heterogeneidade na disponibilidade de fósforo, o que justifica a adoção da aplicação diferenciada. A aplicação em taxa fixa considerou o valor médio, resultando em uma dose uniforme de 160 kg ha^{-1} para toda a área.

A análise quantitativa revelou que a taxa variável demandou um total de 11,39 toneladas de MAP para a área de 87,8 hectares, enquanto a taxa fixa demandaria 14,05 toneladas, ou seja, aproximadamente 19% a mais de insumo. Essa diferença expressa a economia direta proporcionada pelo manejo localizado. Quando avaliada a eficiência, apenas 40,61% da área receberia a dose correta com aplicação fixa, enquanto 47,44% apresentaria excesso e 11,92% ficaria deficiente.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 3 – Mapas de recomendação de fósforo em taxa variável (esquerda), taxa fixa (centro) e simulação de eficiência da taxa fixa (direita).



Fonte: Autores (2025)

Tabela 3 – Quantidade e distribuição das doses em TV de MAP por área

Doses (kg ha^{-1})	Área (ha)	Quantidade (t)
0	10,51	0
80	27,26	2,18
160	41,90	6,7
310	8,11	2,51

Fonte: Autores (2025)

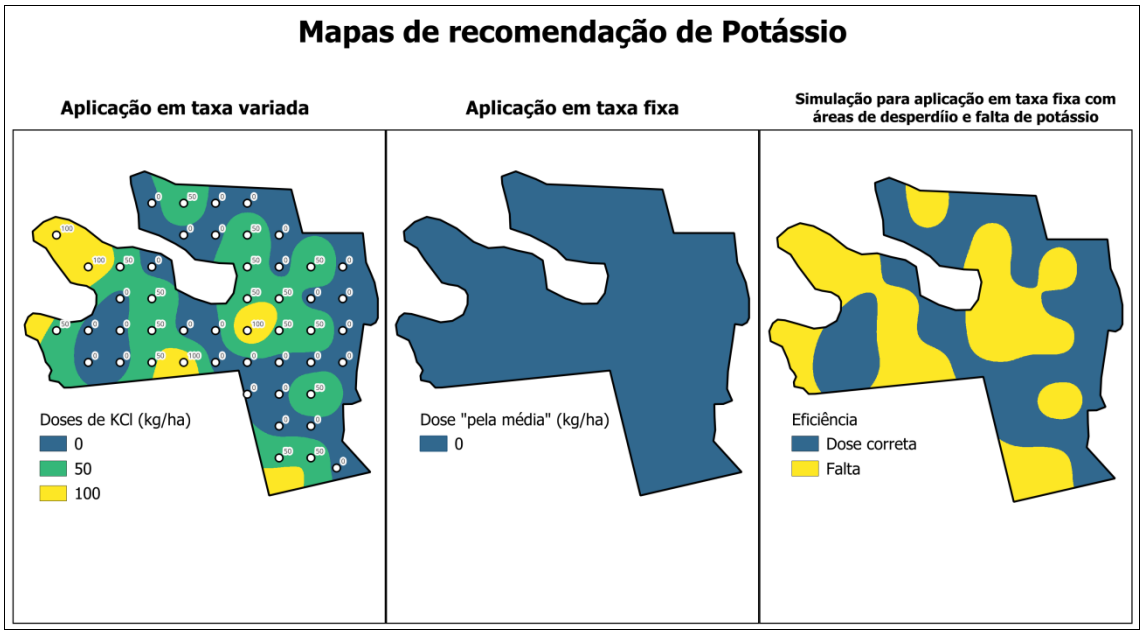
Esse resultado evidencia que o uso da taxa fixa, além de aumentar o custo pela maior quantidade de adubo aplicado, promoveria desperdício em quase metade do talhão. Por outro lado, a taxa variável distribui os nutrientes conforme a real necessidade, otimizando o aproveitamento agronômico e diminuindo a possibilidade de impactos ambientais decorrentes da sobredosagem. Esse cenário confirma observações de trabalhos nacionais que destacam a aplicação em taxa variável como estratégia eficiente para culturas dependentes de fósforo, sobretudo em solos ácidos e de baixa disponibilidade natural do nutriente.

Para o fósforo, cuja fonte considerada foi o MAP com valor médio de R$ 4.100,00 por tonelada, a aplicação em taxa fixa demandaria 14,05 toneladas, resultando em custo de R$ 57.605,00. Na taxa variável, o volume aplicado seria de 11,39 toneladas, com custo de R$ 46.699,00. A diferença de R$ 10.906,00 representa uma economia direta ao produtor, além de evitar desperdícios em áreas que já apresentavam níveis adequados do nutriente. Essa redução de custo comprova o potencial econômico da aplicação em taxa variável, especialmente em insumos de alto valor agregado como o fósforo.

Na Figura 4 são apresentados os mapas de recomendação de potássio considerando a aplicação em taxa variável, a aplicação em taxa fixa e a simulação de

eficiência desta última. A recomendação em taxa variável apresentou valores que oscilaram entre 0, 50 e 100 kg ha^{-1} de KCl, refletindo a elevada heterogeneidade da disponibilidade do nutriente no solo. Já a aplicação em taxa fixa definiu a dose média como 0 kg ha^{-1}, resultando na ausência de adubação potássica em todo o talhão.

Figura 4 – Mapas de recomendação de potássio em taxa variável (esquerda), taxa fixa (centro) e simulação de eficiência da taxa fixa (direita).



Fonte: Autores (2025)

Tabela 4 – Quantidade e distribuição das doses em TV de KCl por área.

Doses (kg ha^{-1})	Área (ha)	Quantidade (t)
0	38,54	0
50	38,50	1,92
100	10.74	1,07

Fonte: Autores

A análise quantitativa mostra que a taxa variável demandaria um total de 3 toneladas de KCl para a área de 87,8 hectares, enquanto a taxa fixa não recomendaria a aplicação de nenhum insumo. Esse contraste evidencia a limitação do manejo por média, que, ao diluir os valores extremos, acaba desconsiderando áreas específicas com deficiência de potássio. A simulação de eficiência comprova esse efeito: 54,5% da área foi classificada como recebendo a dose correta, enquanto 45,5% apresentou deficiência, ou seja, quase metade do talhão ficaria sem o suprimento necessário do nutriente.

No caso do potássio, utilizando o cloreto de potássio (KCl) como referência e considerando o valor médio de R$ 2.050,00 por tonelada, a aplicação em taxa fixa não recomendaria nenhum insumo, gerando custo zero imediato. Já a aplicação em taxa variável indicou a necessidade de 3 toneladas, com custo de R$ 6.150,00. Embora a princípio esse valor represente um acréscimo, é importante destacar que a taxa variável permite identificar e corrigir áreas deficientes em potássio, assegurando maior

equilíbrio nutricional e evitando perdas de produtividade decorrentes da ausência do nutriente. Assim, o custo adicional deve ser interpretado como investimento, que tende a ser compensado pelo incremento de rendimento da lavoura e pela melhor eficiência no uso dos demais fertilizantes.

Tabela 5 – Comparação dos custos estimados entre aplicação em taxa fixa e taxa variável de corretivos e fertilizantes

Insumo	Qtd. VRT (t)	Qtd. TF (t)	Custo VRT (R$)	Custo TF (R$)	Diferença de custo (R$)
Calcário	328	324,86	36.080,00	35.734,60	-345,40
MAP (Fósforo)	11,39	14,05	46.699,00	57.605,00	10.906,00
KCl (Potássio)	3	0	6.150,00	0	-6150,00

Fonte: Autores (2025)

Os resultados obtidos neste estudo estão em consonância com evidências já descritas na literatura internacional. Programas de Agricultura de Precisão têm sido apontados como alternativa eficaz para lidar com problemas ambientais, pois limitam o escoamento de nutrientes e produtos químicos ao ajustar de forma precisa as aplicações de fertilizantes às necessidades das culturas. Além disso, análises empíricas demonstram que a aplicação em taxa variável pode gerar benefícios simultaneamente ambientais e econômicos, reduzindo perdas de nitrogênio e fósforo e, ao mesmo tempo, aumentando o retorno líquido ao produtor devido à economia no uso de insumos (INTARAPAPONG et al., 2002).

De maneira geral, os resultados confirmam que a aplicação em taxa variável constitui uma estratégia eficiente para conciliar produtividade, sustentabilidade e viabilidade financeira. O manejo localizado permitiu reduzir custos onde havia excesso, investir de forma direcionada onde havia deficiência e manter o equilíbrio químico do solo em toda a área. Assim, além de promover racionalidade no uso dos insumos e reduzir riscos ambientais, a taxa variável apresentou ganho econômico expressivo, reforçando o potencial dessa tecnologia como ferramenta fundamental da Agricultura de Precisão para a intensificação sustentável da produção agrícola em cenários de elevada variabilidade edáfica.

4 CONCLUSÃO

A comparação entre as aplicações em taxa fixa e taxa variável para calagem, fósforo e potássio evidenciou de forma consistente a relevância do manejo localizado não apenas do ponto de vista agronômico e ambiental, mas também econômico.

Embora a quantidade total de insumos demandada pela taxa variável seja semelhante à da taxa fixa, a diferença está na distribuição espacial das doses, que resulta em maior eficiência e sustentabilidade.

No caso da calagem, o custo final entre as duas estratégias foi praticamente equivalente, mas a taxa variável assegurou uma correção mais precisa da acidez, prevenindo áreas sub ou supercaladas.

Para o fósforo, a taxa variável representou economia direta de aproximadamente R$ 10.900,00 em comparação à aplicação fixa, além de evitar desperdícios em áreas já supridas.

No potássio, ainda que a taxa variável tenha demandado um investimento de cerca de R$ 6.150,00 em insumo, esse custo adicional garantiu a correção de áreas deficientes, evitando perdas de produtividade que poderiam comprometer o retorno global da lavoura.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à empresa Farm 360 – Assessoria em Agricultura de Precisão e Digital, pela disponibilização dos dados utilizados neste trabalho. A colaboração foi essencial para o desenvolvimento desta pesquisa e para a aplicação prática dos conceitos discutidos, contribuindo significativamente para a integração entre o meio acadêmico e as demandas reais do campo.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

BAHMUTSKY, V.; et al. Environmental impacts of variable rate fertilization in agriculture. **Journal of Cleaner Production**, v. 450, p. 141268, 2024.

CHERUBIN, M. R.; et al. Twenty years of precision agriculture research in Brazil: Lessons learned and perspectives. **Agriculture**, v. 12, n. 11, p. 1882, 2022.

DUCHON, J. Splines minimizing rotation-invariant semi-norms in Sobolev spaces. In: SCHEMPP, W.; ZELLER, K. (Eds.). **Constructive Theory of Functions of Several Variables**. Oberwolfach, Springer Lecture Notes in Mathematics, v. 571, p. 85–100, 1977.

FARMONAUT. **Variable Rate Fertilizer Technology**: Applications & Benefits. Farmonaut Blog, 2025. Disponível em: https://farmonaut.com/precision-farming/variable-rate-fertilizer-technology-applications-7-benefits.

GEOPARD. The environmental benefits of precision agriculture. **Geopard Tech Blog**, 2023. Disponível em: https://geopard.tech/blog/the-environmental-benefits-of-precision-agriculture/.

GRIFFIN, T. Precision Agriculture Adoption in Brazil. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 14, n. 4, p. 42–54, 2005. Disponível em: https://rpa.sede.embrapa.br/RPA/article/download/549/498/1175.

INTARAPAPONG, P.; HITE, D.; HUDSON, D. The economic and environmental impacts of variable rate application of fertilizer in the southeastern United States. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 27, n. 2, p. 347-358, 2002.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006.

MONTEIRO, L. A.; PARFITT, J. M. B.; CHERUBIN, M. R. Agricultura de Precisão: fundamentos e aplicações. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 4, p. 215–223, 2021. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8388655/.

NUTRIENT MANAGEMENT. **Nutrient management** – The 4R principles. Wikipedia, 2025. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Nutrient_management.

SHARMA, A.; LI, J.; DAHIYA, R. S. Precision Agriculture: Towards Sustainability and Food Security. **Sustainability**, v. 17, n. 3, p. 1250, 2025.

SPÄTI, K.; et al. Variable rate fertilization: Adoption and economic impacts in Europe. **Ecological Economics**, v. 180, p. 106870, 2021.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 44

INTEGRAÇÃO DE VARIÁVEIS TOPOGRÁFICAS, PRODUTIVIDADE E FERTILIDADE PARA DELIMITAÇÃO DE ZONAS DE MANEJO EM LAVOURA

Integration of topographic variables, yield, and soil fertility for delimiting management zones in a crop field

Silmar Mateus Dallabrida[1]; Jean Michel Moura-Bueno[1;2]; Bruna Trevizan Paese[2]; Marco Ivan Rodrigues Sampaio[1]; Maísa Jungbeck[1]

[1] Universidade de Cruz Alta – UNICRUZ, Campus Rodovia Municipal Jacob Della Méa, km 5.6 - Parada Benito Cruz Alta - Rio Grande do Sul - CEP 98005-972, silmar.dallabrida@gmail.com; bueno.jean1@gmail.com; marsampaio@unicruz.edu.br; maisajungbeck@hotmail.com
[2] Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, nº 1000, Camobi, CEP 97105-900, Santa Maria- RS, Brasil, brunatpaese@hotmail.com

RESUMO

O trabalho visou avaliar a correlação entre variáveis do solo e topográficas com a produtividade de grãos e delimitar zonas de manejo (ZM) com o input de diferentes conjuntos de dados para um talhão sob cultivo de soja e milho. O estudo foi realizado em uma área comercial de Pejuçara no estado do Rio Grande do Sul. Foram coletados dados de variáveis de solo (profundidade de solo, nutrientes, matéria orgânica e pH) por meio de uma grade de amostragem com 71 pontos e variáveis topográficas derivadas de um modelo digital do terreno. Esses dados foram correlacionados a mapas de produtividade de soja (2020, 2021, 2023, 2024) e milho (2025). As ZM foram geradas por meio do algoritmo k-means. As variáveis topográficas declividade, fator LS e índice de umidade tiveram forte correlação com a produtividade. A integração de médias históricas de produtividade com variáveis topográficas e variáveis de solo foi a estratégia mais eficiente para definir ZM, visando orientar práticas de manejo.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Áreas de manejo específico. Variabilidade do terreno.

ABSTRACT

This study aimed to (i) evaluate the correlation between soil and topographic variables with grain yield, and (ii) delineate management zones (MZ) using different input datasets in a commercial field cultivated with soybean and maize. The experiment was conducted in Pejuçara, Rio Grande do Sul, Brazil. Soil variables (soil depth, nutrients, organic matter, and pH) were collected through a georeferenced grid with 71 sampling points, while topographic variables were derived from a digital terrain model. These datasets were correlated with yield maps of soybean (2020, 2021, 2023, 2024) and maize (2025). MZ were generated using the k-means algorithm. Topographic variables such as slope, LS factor, and topographic wetness index showed strong correlations with yield. The integration of historical yield averages with topographic and soil variables proved to be the most efficient strategy for defining MZ, providing a basis for site-specific management practices.

Keywords: Precision agriculture. Management zones. Digital terrain mapping.

1 INTRODUÇÃO

A Agricultura de Precisão (AP) busca otimizar o uso de insumos, sementes e água, reduzindo a variabilidade espacial e aumentando a produtividade e a rentabilidade. Entre suas aplicações, destaca-se a delimitação de Zonas de Manejo (ZM), que podem ser entendidas como áreas com características semelhantes de relevo, profundidade, textura, umidade e fertilidade do solo, que permitem intervenções específicas (FLEMING et al., 1999; MOLIN et al., 2015).

Oferecer subsídios para a definição das ZM são um dos desafios da AP. Está identificação pode ser feita com informações de atributos do solo ou pela sequência de mapas de produtividade, ou por indicadores compostos (MOLIN, 2002). Apesar dos avanços, muitas lavouras ainda desconsideram variáveis topográficas e pedológicas, como declividade e profundidade do solo, na definição de ZM, além da escassez de estudos que utilizem técnicas como o Mapeamento Digital de Solos (MDS) para caracterizar a variabilidade espacial (McBRATNEY et al., 2003; HORST-HEINEN et al., 2021; NALIN et al., 2023).

A declividade de uma área de produção agrícola é uma variável muito importante, uma vez que, essa variável influência no escoamento superficial da água e no processo erosivo e, consequentemente, na produtividade das culturas (ZHANG et al., 2021). Da mesma, forma, a profundidade do solo tem relação o volume de solo disponível para exploração por parte do sistema radicular, além do armazenamento de água e nutrientes disponíveis para as culturas (HIRZEL e MATUS, 2013; SCHREINER-MCGRAW e BAFFAUT, 2023; BAI et al., 2024).

A integração de dados de produtividade, atributos químicos (P, K, Ca, Mg, MO, pH), profundidade e variáveis topográficas (declividade, curvatura, fator LS, índice de umidade) pode gerar ZM mais consistentes, visto que apenas produtividade e fertilidade não explicam toda a variabilidade produtiva (MORAES et al., 2016). Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi (i) avaliar a correlação entre variáveis do solo e topográficas com a produtividade de grãos e (ii) delimitar ZM a partir de diferentes conjuntos de dados em um talhão cultivado com soja e milho.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em uma área agrícola de 141,37 ha, localizada em Pejuçara, RS, Brasil (28°24'3,42"S; 53°29'27,36"O), com altitude entre 400 e 450 m (média de 430 m). O clima, classificado como Cfa segundo Köppen, é subtropical úmido, sem estação seca definida, com temperatura média anual de 19,5 °C (ALVARES et al., 2013).

O relevo varia de suave ondulado a ondulado, com declividades mais acentuadas próximas às drenagens (3 a 10%). A geologia local é derivada da Formação Serra Geral, composta por basaltos, e o solo predominante é Latossolo Vermelho Distroférrico típico (SANTOS et al., 2018). A área é cultivada com lavouras anuais em sistema plantio direto há mais de 20 anos. A caracterização da profundidade do solo foi realizada por tradagens em 71 pontos amostrais (Figura 1), utilizando trado holandês, com profundidade máxima de 100 cm. Os pontos foram georreferenciados em campo com receptor GNSS.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 1. Localização da área de estudo, com indicação dos pontos de amostragem de solo (n = 71) os quais foram utilizados para gerar o mapa de profundidade do solo e de variáveis químicas.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2024).

2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados

Os valores de profundidade do solo foram interpolados pelo método geoestatístico de co-krigagem, utilizando Mapeamento Digital de Solos (MDS) (McBRATNEY et al., 2003). As covariáveis foram derivadas de um Modelo Digital do Terreno (MDT, 5 m de resolução), gerado a partir de dados da colhedora equipada com piloto automático e correção RTK fornecida pela SLC Máquina (acurácia de 4 cm).

A partir do MDT (altitude), foram obtidas no QGIS v.3.4 (ferramenta Basic Terrain Analysis) as variáveis topográficas: declividade, curvatura, fator LS, distância à rede de drenagem e índice de umidade, usadas na calibração do modelo de co-krigagem. O desempenho da predição foi avaliado por validação cruzada, considerando coeficiente de determinação (R^2) e erro médio absoluto (MAE). Toda a modelagem foi realizada no software R (R CORE TEAM, 2022).

Os mapas de produtividade de soja (2020, 2021, 2023, 2024) e milho (2025) foram obtidos por sensores embarcados nas colhedoras John Deere S690 (2020–2024) e John Deere X9 (2025). Já os mapas de variáveis químicas (P, K, Ca, Mg, pH e MO), referentes a 2021, 2022 e 2023, foram disponibilizados pela empresa de Agricultura de Precisão responsável pela área. Posteriormente, os dados de produtividade, variáveis químicas, profundidade e topografia foram integrados e exportados em planilhas Excel para análise de correlação univariada de Pearson.

As ZM foram definidas a partir desses conjuntos de dados pelo algoritmo k-means (pacote paar, PACCIORETTI et al., 2024), visando a clusterização em grupos homogêneos. Foram testadas três estratégias: i) produtividade + variáveis químicas; ii) produtividade + profundidade + variáveis topográficas; e iii) produtividade + variáveis químicas + profundidade + variáveis topográficas.

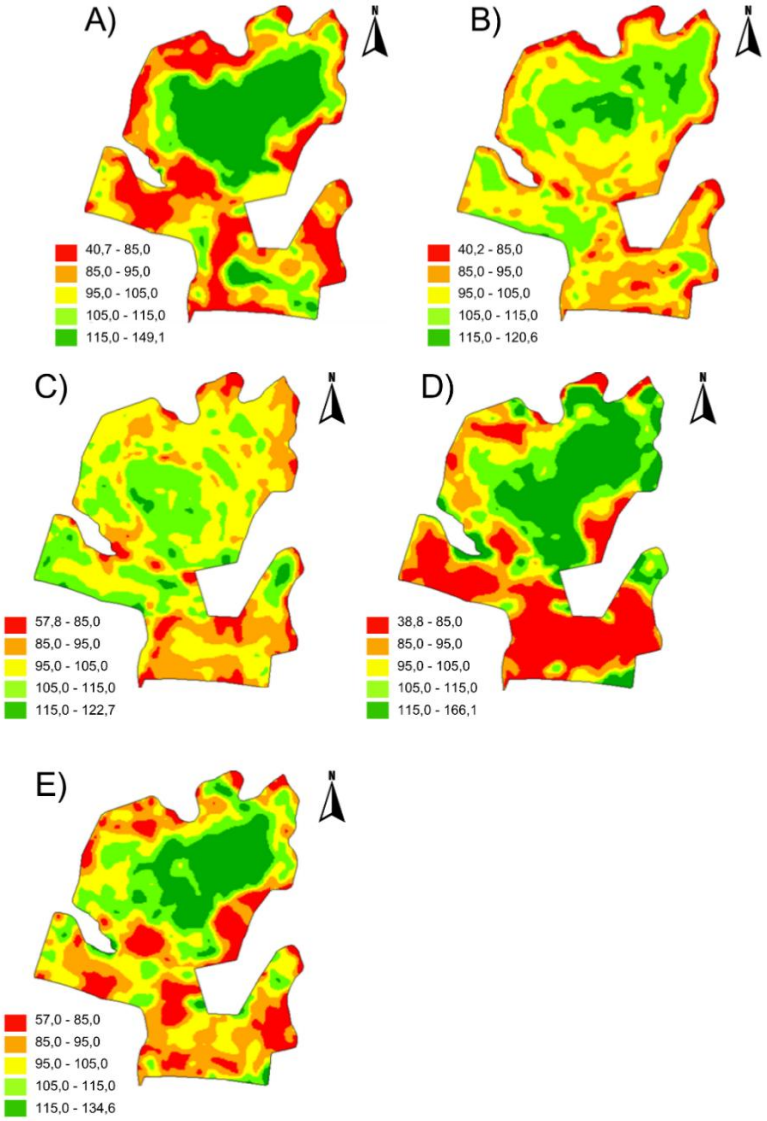
ISBN 978-65-990392-6-3

O número ótimo de clusters foi definido com base em três índices estatísticos: coeficiente de partição (PC), que avalia a nitidez dos agrupamentos; entropia de partição (PE), que mede a incerteza de classificação; e índice composto de desempenho, que integra ambos os critérios. Os valores ótimos foram determinados pela maximização do PC e pela minimização de PE e do índice composto (Fridgen et al., 2004; Albornoz et al., 2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área estudada conta com histórico consistente de monitoramento da produtividade desde 2020 (Figura 2). Os mapas revelam ampla variabilidade espacial interna, mas com padrões recorrentes: regiões de maior e menor rendimento tendem a se repetir.

Figura 2. Mapas de variabilidade espacial da produtividade de soja (% da produtividade normalizada relativa à média) nas safras 2019-2020 (A), 2020-2021 (B), 2022-2023 (C) e 2023-2024 (D) e milho safra 2024-2025 (E).



Fonte: Autor (2024).

ISBN 978-65-990392-6-3

Em anos secos, as diferenças se acentuam, enquanto em safras com chuvas regulares a variabilidade diminui, refletindo-se nas médias de produtividade. No Planalto do RS, a instabilidade climática é fator determinante dessa variabilidade (BERLATO et al., 2005).

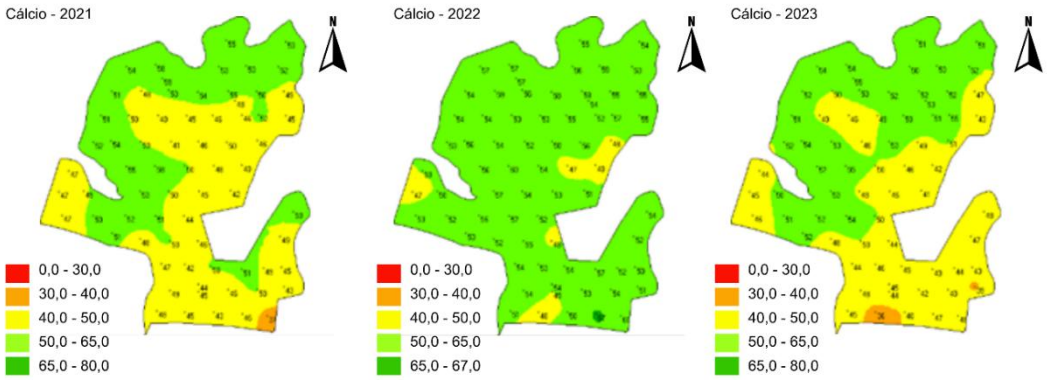
Na safra de soja 2019/2020, a média foi de 57,7 sacos ha^{-1}, associada a apenas 400 mm de precipitação, valor muito abaixo da demanda hídrica ideal (~800 mm), acentuando o contraste entre áreas de alto e baixo rendimento (Figura 2; TAGLIAPIETRA et al., 2022). Em 2020/2021, a produtividade média atingiu 87,28 sacos ha^{-1}, com 600–700 mm de chuva, o que reduziu a variabilidade espacial. Já em 2022/2023, a estiagem severa (<300 mm) e temperaturas elevadas resultaram em apenas 35,41 sacos ha^{-1}. Em contrapartida, em 2023/2024 a precipitação próxima de 800 mm proporcionou 94,62 sacos ha^{-1}, reforçando o efeito positivo da disponibilidade hídrica. Resultados semelhantes foram relatados por Han et al. (2021) e Silva (2014).

Para o milho (2024/2025), a média foi de 159,47 sacos ha^{-1}, sob precipitação intermediária (400 mm), mantendo alto rendimento. Segundo Lopes et al. (2019), a produtividade do milho apresenta relação positiva com a precipitação, mas déficits hídricos moderados afetam menos essa cultura em comparação à soja. Em síntese, a série histórica confirma a precipitação como principal fator de desempenho produtivo, corroborando observações de diferentes regiões agrícolas no Brasil (LOPES et al., 2019).

Além da produtividade, foram realizados três ciclos de mapeamento de variáveis químicas do solo (2021, 2022 e 2023), fundamentais para orientar a aplicação de corretivos e fertilizantes em taxas variáveis. Essa prática, segundo Basso et al. (2016) e Basso, Dobrowolski e McKay (2017), otimiza o uso de insumos, reduz custos e minimiza impactos ambientais.

A análise dos mapas (Figuras 3 a 8) mostra tendência de homogeneização nos teores de nutrientes, especialmente Ca, K e P (Figuras 3, 5 e 6), que inicialmente apresentavam elevada variabilidade espacial. Esse padrão, também observado por Silva et al. (2017), confirma a eficácia do manejo localizado na estabilização da fertilidade em áreas heterogêneas, favorecendo o equilíbrio nutricional ao longo do tempo.

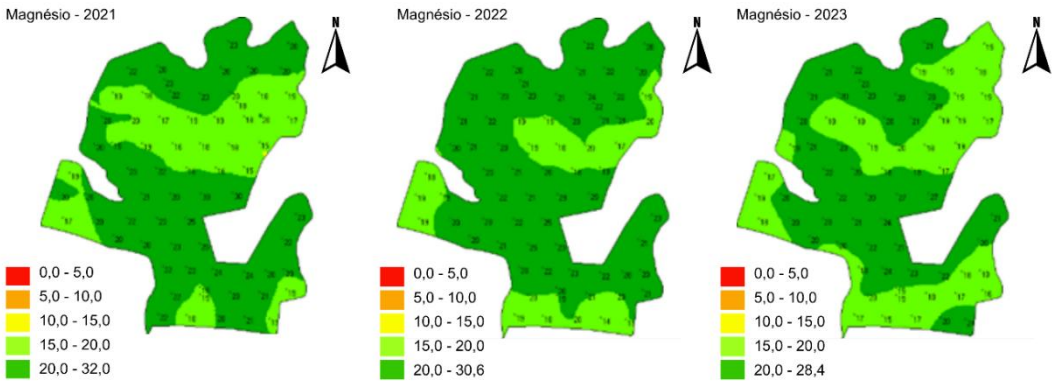
Figura 3. Mapas de variabilidade espacial de cálcio (% da CTC) (inserir unidade de medida) nos anos de 2021, 2022 e 2023.



Fonte: Autor (2024).

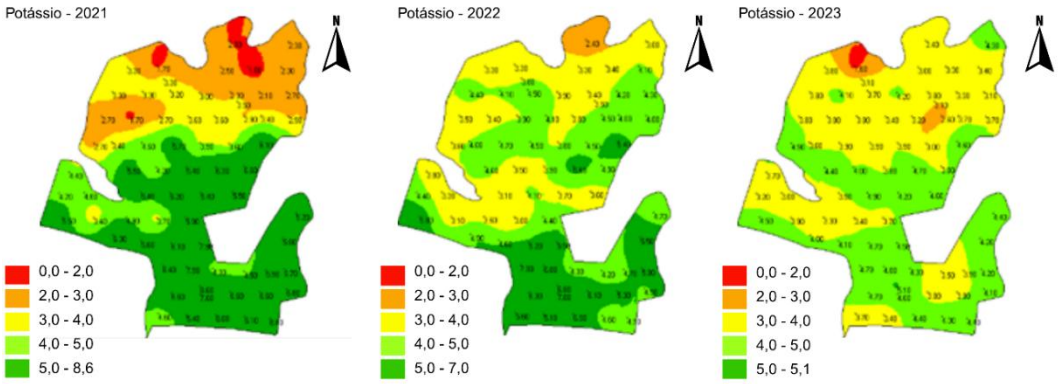
ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 4. Mapas de variabilidade espacial de magnésio (% da CTC) (inserir unidade de medida) nos anos de 2021, 2022 e 2023.



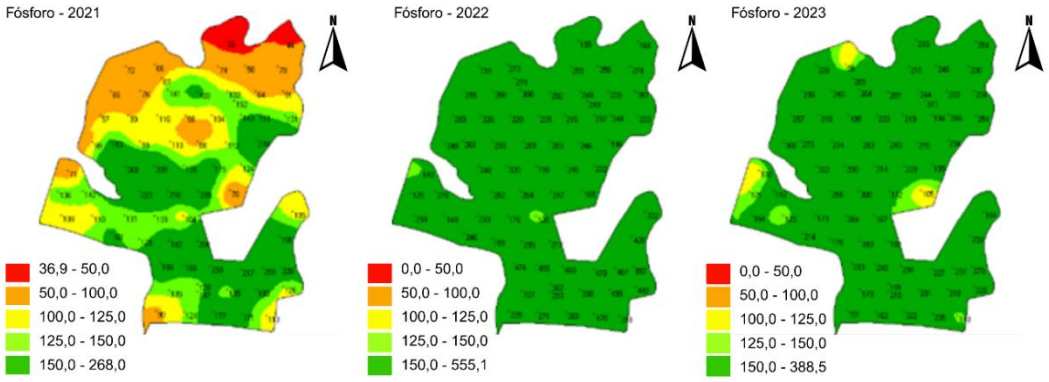
Fonte: Autor (2024).

Figura 5. Mapas de variabilidade espacial de potássio (% da CTC) (unidade de medida) nos anos de 2021, 2022 e 2023.



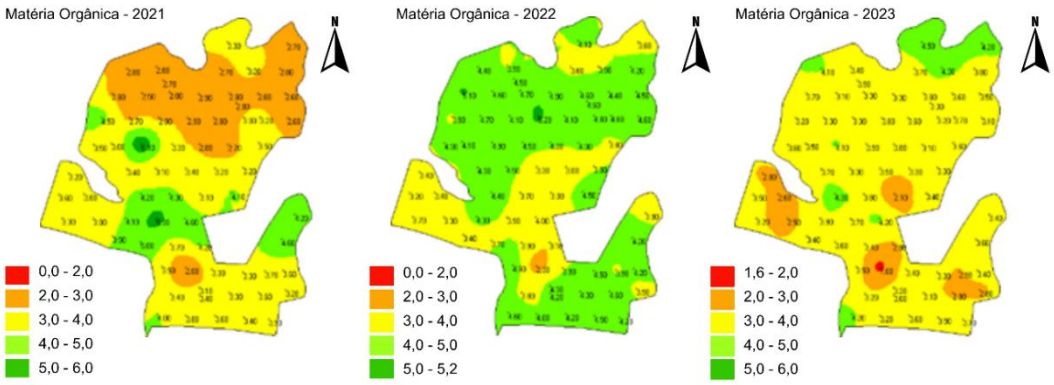
Fonte: Autor (2024).

Figura 6. Mapas de variabilidade espacial de fósforo (% Relativo) (unidade de medida) nos anos de 2021, 2022 e 2023.



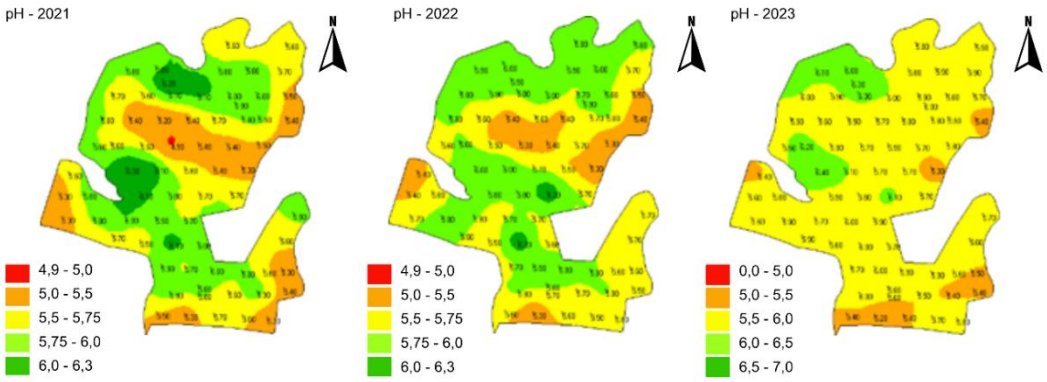
Fonte: Autor (2024).

Figura 7. Mapas de variabilidade espacial de matéria orgânica (%) (unidade de medida) nos anos de 2021, 2022 e 2023.



Fonte: Autor (2024).

Figura 8. Mapas de variabilidade espacial de pH (em H_2O) nos anos de 2021, 2022 e 2023.



Fonte: Autor (2024).

A análise de correlação de Pearson (Tabela 1) indicou relação fraca entre produtividade e teores de nutrientes no solo, evidenciando que a fertilidade, embora essencial, não explica isoladamente o rendimento (MORAES et al., 2016). Destacou-se a forte correlação positiva (r = 0,79) entre a soja (2020) e o milho (2025), sugerindo efeito residual positivo associado a condições adequadas de manejo e fertilidade (RESENDE et al., 2018).

Para o milho, observaram-se correlações baixas com pH (r = 0,17) e MO (r = 0,14) e média com Ca (r = 0,31), confirmando a importância desse nutriente para funções estruturais e fisiológicas (RAIJ et al., 2001). Na soja (safra 2022/2023), as correlações foram positivas com pH (r = 0,17), Ca (r = 0,34) e MO (r = 0,27), reforçando sua contribuição ao desenvolvimento da cultura (MALAVOLTA, 2006). Já em 2021, a soja apresentou correlações negativas com K (r = -0,26) e Mg (r = -0,28), possivelmente ligadas a antagonismos iônicos, como excesso de K reduzindo a absorção de Mg e Ca (ERNANI et al., 2007; JONES JUNIOR, 2012; XU et al., 2021). A MO, com correlação média (r = 0,29), destacou-se pelo papel na retenção de nutrientes e melhoria da estrutura do solo.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 1. Correlação de Pearson entre a produtividade de soja e milho e variáveis de fertilidade solo (teores de Ca, K, MO, P e pH em água).

	Soja	Soja	Ca	Mg	K	MO	P	pH	Ca	Mg	K	MO	P	pH	Soja	Ca	Mg	K	MO	P	pH	Soja	Milho	Média
	2020	2021							2022						2023							2024	2025	(2017-2025)
Soja (2020)	1																							
Soja (2021)	0,53	1																						
Ca (2021)	-0,16	0,01	1																					
Mg (2021)	-0,28	-0,28	0,12	1																				
K (2021)	-0,21	-0,26	-0,63	0,21	1																			
MO (2021)	-0,26	-0,16	-0,14	0,34	0,46	1																		
P (2021)	-0,15	-0,09	-0,20	0,17	0,64	0,37	1																	
pH (2021)	-0,24	-0,03	0,62	0,50	-0,11	0,08	0,24	1																
Ca (2022)	-0,10	0,06	0,48	0,09	-0,33	-0,17	-0,12	0,43	1															
Mg (2022)	-0,04	-0,06	0,11	0,79	-0,05	0,19	0,04	0,43	0,04	1														
K (2022)	-0,08	-0,10	-0,55	-0,06	0,78	0,16	0,46	-0,19	-0,38	-0,26	1													
MO (2022)	0,29	0,29	0,11	-0,23	-0,34	-0,15	-0,15	0,03	0,44	-0,12	-0,11	1												
P (2022)	-0,15	-0,18	-0,19	0,07	0,49	0,01	0,48	0,03	0,17	-0,19	0,60	0,13	1											
pH (2022)	-0,18	-0,10	0,63	0,58	-0,20	-0,07	0,01	0,74	0,48	0,59	-0,27	-0,11	0,02	1										
Soja (2023)	0,64	0,30	0,08	-0,13	-0,45	-0,21	-0,27	-0,08	0,19	0,13	-0,45	0,19	-0,37	-0,05	1									
Ca (2023)	0,10	0,24	0,75	-0,05	-0,63	-0,12	-0,22	0,49	0,52	0,10	-0,65	0,19	-0,44	0,48	0,34	1								

ISBN 978-65-990392-6-3

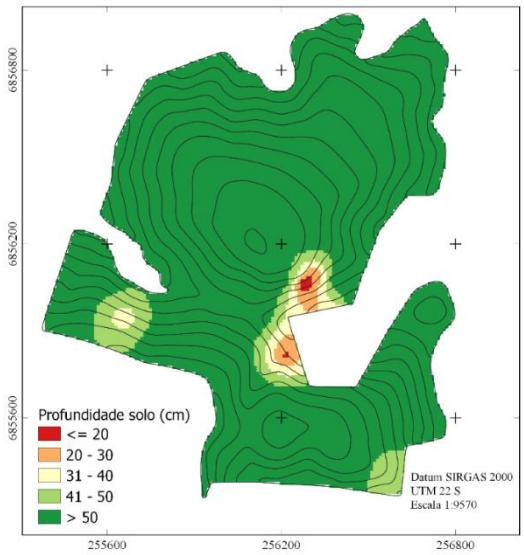
Mg (2023)	-0,10	-0,14	0,09	0,77	0,06	0,16	0,09	0,45	0,21	0,78	-0,27	-0,18	-0,17	0,56	0,08	0,26	1						
K (2023)	-0,11	-0,15	-0,45	0,23	0,68	0,34	0,46	-0,07	-0,24	0,12	0,56	-0,27	0,28	-0,07	-0,30	-0,42	0,10	1					
MO (2023)	0,08	0,02	0,41	-0,08	-0,44	0,11	-0,40	0,05	0,39	-0,08	-0,44	0,41	-0,29	0,06	0,27	0,46	-0,08	-0,30	1				
P (2023)	0,13	0,20	0,23	-0,21	-0,15	-0,14	0,27	0,23	0,29	-0,05	-0,02	0,36	0,21	0,17	0,14	0,30	-0,16	0,15	0,24	1			
pH (2023)	0,01	0,11	0,63	0,31	-0,37	-0,15	-0,03	0,65	0,50	0,40	-0,45	0,04	-0,26	0,71	0,17	0,82	0,60	-0,14	0,18	0,28	1		
Soja (2024)	0,31	0,37	-0,04	-0,10	-0,07	0,16	-0,08	-0,09	-0,12	0,11	-0,13	-0,10	-0,36	-0,03	0,20	0,19	0,10	0,04	-0,04	-0,04	0,12	1	
Milho (2025)	0,79	0,48	0,05	-0,21	-0,40	-0,26	-0,20	-0,06	0,19	0,00	-0,25	0,28	-0,20	-0,07	0,74	0,31	-0,04	-0,28	0,14	0,17	0,17	0,24	1
Média (17–25)	0,90	0,65	0,00	-0,29	-0,37	-0,21	-0,21	-0,14	0,14	0,00	-0,23	0,28	-0,26	-0,11	0,77	0,30	-0,10	-0,22	0,16	0,18	0,12	0,43	0,88	1

Fonte: Autor (2024).

ISBN 978-65-990392-6-3

O mapa de profundidade do solo (Figura 9) mostrou baixa variabilidade espacial, coerente com a homogeneidade dos Latossolos predominantes. Esses solos, profundos, bem drenados e fisicamente estáveis, representam estágios avançados de intemperismo (STRECK et al., 2018; SILVA et al., 2018; SANTOS et al., 2018). No Noroeste do RS, tais condições favorecem o manejo mecanizado e garantem alta aptidão agrícola para grãos, desde que a fertilidade química seja corrigida e bem conduzida.

Figura 9. Mapas de variabilidade espacial da profundidade do solo gerado por interpolador geoestatístico de co-krigagem.



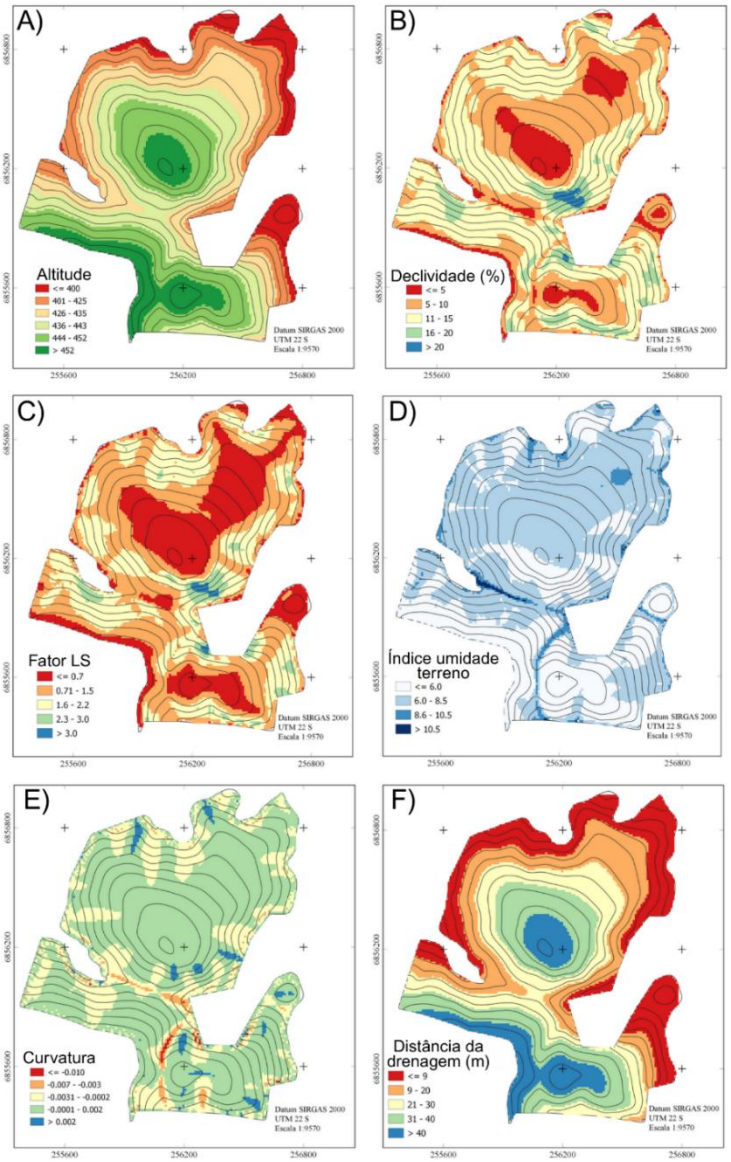
Fonte: Autor (2024).

As variáveis topográficas (Figura 10) mostraram altitudes que variam entre 403 a 461 metros e declividade predominantemente <15%, com variação entre 3 a 25%. O fator LS superou 1,5 em áreas irregulares, indicando maior potencial de escoamento e erosão (BADAVATH; SAHOO; SAMAL, 2024). O índice de umidade topográfica (IUT) variou de <6 (áreas secas) a >10 (maior retenção hídrica). A curvatura identificou zonas côncavas, associadas ao acúmulo de água, e convexas, ligadas a escoamento superficial acelerado, atributo fundamental para compreender a dinâmica hídrica, erosão e redistribuição de água, MO e nutrientes (WILSON; GALLANT, 2000; LEUTHOLD et al., 2022).

As variáveis topográficas correlacionaram-se expressivamente com a produtividade (Tabela 2). O IUT apresentou correlação moderada a forte com a soja (r = 0,59–0,78) e forte com o milho (r = 0,84). A profundidade do solo também foi positiva (r = 0,33–0,66 para a soja; r = 0,54 para o milho). Em contrapartida, declividade, fator LS e curvatura correlacionaram-se negativamente, evidenciando o impacto desfavorável de áreas mais inclinadas e suscetíveis à erosão. Resultados semelhantes foram relatados por Florentino et al. (2019), que observaram redução de produtividade em terrenos mais íngremes.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 10. Mapas de variabilidade espacial das variáveis topográficas altitude (A), declividade (B), fator LS (C), índice de umidade do terreno (D), curvatura do terreno (E), distância da rede de drenagem (F).



Fonte: Autor (2024).

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 2 – Correlação de Pearson entre a produtividade de soja e milho, variáveis topográficas e profundidade do solo.

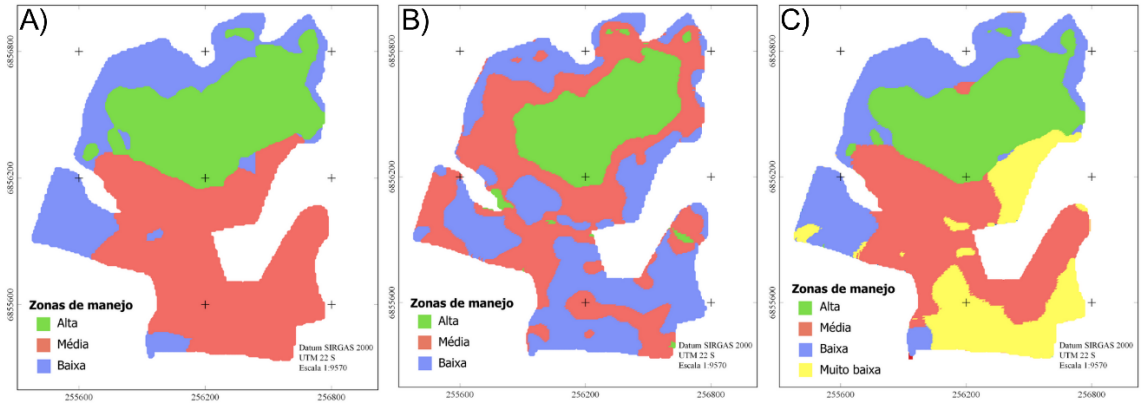
	Soja (2020)	Soja (2021)	Soja (2023)	Soja (2024)	Milho (2025)	Profundidade do solo
Prod. soja 2020	1,00					
Prod. soja 2021	0,54*	1,00				
Prod. soja 2023	0,31	0,65*	1,00			
Prod. soja 2024	0,66*	0,90*	0,75*	1,00		
Prod. milho 2025	-	-	-	-	1,00	
Profundidade do solo	0,47*	0,33*	0,66*	0,33	0,54*	1,00
IUT[1]	0,73*	0,67*	0,59*	0,78*	0,84*	0,47
Declividade	-0,65*	-0,68*	-0,44*	-0,72	-0,51*	0,03
Fator LS	-0,60*	-0,70*	-0,59*	-0,70	-0,55*	0,03
Curvatura	-0,73*	-0,64*	-0,73*	-0,44	-0,52	-0,59*
DRD[2]	0,30	0,22	-0,49	0,54	0,64*	0,91*
Altitude	0,36	0,29	0,41	0,65*	0,55	0,88*

[1]IUT = índice de umidade topográfica; [2]DRD = Distância da rede drenagem.

Fonte: Autor (2024).

A comparação entre os mapas de ZM (Figura 11) mostrou que o uso de diferentes conjuntos de dados influencia diretamente a delimitação. O mapa A, elaborado apenas com produtividade e variáveis químicas, apresentou segmentação simplificada em três zonas. No mapa B, a inclusão de variáveis topográficas e profundidade do solo gerou maior refinamento, enquanto o mapa C, que integrou todas as variáveis, proporcionou a segmentação mais detalhada, incluindo a classe “muito baixa”, indicativa de áreas com severas restrições agrícolas.

Figura 11 – Mapa de zonas de manejo (ZM) geradas a partir do cruzamento dos mapas de produtividade (soja e milho) + fertilidade do solo (teores de P, K e saturação por bases) (A), produtividade + profundidade do solo + variáveis topográficas (altitude, distância da rede de drenagem, declividade, fator LS, curvatura e índice de umidade do terreno) (B) e produtividade + fertilidade do solo + profundidade do solo + variáveis topográficas (C).



Fonte: Autor (2024).

A baixa similaridade entre os mapas evidencia que variáveis com baixa correlação atuam de forma complementar, aumentando a precisão da discriminação espacial. Assim, a construção de ZM robustas requer a integração criteriosa de dados históricos de produtividade e variáveis físicas, químicas, pedológicas e topográficas, visando maximizar a acurácia do processo decisório em Agricultura de Precisão.

Destaca-se ainda a necessidade de os produtores utilizarem plenamente os monitores de colheita, uma vez que cada safra não registrada representa perda de informações estratégicas para a formação do histórico produtivo e a gestão futura. Recomenda-se, também, que estudos futuros explorem o potencial de variáveis topográficas em áreas com diferentes classes de solo e maior variabilidade de profundidade, além de avaliar seu desempenho na predição de produtividade em anos de restrição hídrica.

4 CONCLUSÃO

A área estudada apresentou correlação significativa forte a moderada das variáveis topográficas (declividade, curvatura e índice de umidade do terreno – $r > 0,55$) e da profundidade do solo (r entre 0,40 e 0,60) com as produtividades obtidas nas safras avaliadas. Por outro lado, as correlações das variáveis químicas de solo com a produtividade foram, em geral, baixas e não significativas ($r < 0,25$).

Os resultados indicam que a integração de variáveis químicas de solo, topográficas e da profundidade do solo é fundamental para a delimitação de zonas de manejo mais precisas em Agricultura de Precisão. A utilização de médias históricas de produtividade, correlacionadas com essas variáveis mostrou-se uma estratégia eficiente para identificar áreas com diferentes potenciais produtivos e orientar práticas específicas de manejo, como a alocação diferenciada de insumos e a adoção de medidas de conservação do solo e da água.

ISBN 978-65-990392-6-3

REFERÊNCIAS

BAI, X., SMIDT, S. J., FAN, Y., BROPHY, T., HER, Y. G., MANIRAKIZA, N., BHADHA, J. H. Farming shallow soils: Impacts of soil depth on crop growth in the Everglades Agricultural Area of Florida, USA. **Field Crops Research**, 316, 109523, 2024. DOI: 10.1016/j.fcr.2024.109523

BASSO, B. et al. Benefícios ambientais e econômicos da fertilização com nitrogênio em taxa variável em uma zona vulnerável a nitrato. **Science of the Total Environment**, v. 545-546, p. 227-235, 2016.

BASSO, B.; DOBROWOLSKI, J.; McKAY, C. Da Dust Bowl aos drones e ao big data: a próxima revolução na agricultura. **Geographical Review**, v. 107, n. 2, p. 158-165, 2017.

BERLATO, M. A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D. C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 423-432, 2005.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. dos. **Fertilidade do solo para plantas cultivadas**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2007.

FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. de. Nutrição mineral de plantas. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2018.

FLEMING, K. L. et al. Evaluating farmer developed management zone maps for precision farming. **In: Proceedings of the Fourth International Conference on Precision Agriculture**, Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1999.

FLORENTINO, H. O. et al. Relação entre atributos do terreno e produtividade agrícola em áreas de agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, 2019.

HORST-HEINEN, T. Z. et al. Soil depth prediction by digital soil mapping and its impact in pine forestry productivity in South Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 488, p. 118983, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118983. Acesso em: 10 jun. 2025.

HAN, D. et al. Melhorando as estimativas de rendimento do trigo integrando um índice de monitoramento de seca por sensoriamento remoto no algoritmo simples para modelo de estimativa de rendimento. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 14, p. 10383-10394, 2021. DOI: https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3119398.

HIRZEL, J., MATUS, I. Effect of soil depth and increasing fertilization rate on yield and its components of two durum wheat varieties. **Chilean journal of agricultural research**, 73(1), 55-59, 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392013000100008

JONES JUNIOR, J.B. **Plant Nutrition and Soil Fertility Manual**, 2.ed. CRC Press, 2012. 273p.

BADAVATH, N.; SAHOO, S.; SAMAL, R. Unveiling Meghalaya topography: slope length gradient (LS) factor estimation for insightful soil erosion evaluation. **Journal of Engineering and Applied Science**, v. 71, p. 174, 2024. DOI: https://doi.org/10.1186/s44147-024-00508-

5.Disponívelem: https://jeas.springeropen.com/articles/10.1186/s44147-024-00508-5. Acesso em: 11 ago. 2025.

LEUTHOLD, S. J. et al. Weather-dependent relationships between topographic variables and yield of maize and soybean. **Field Crops Research**, v. 276, p. 108368, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108368.

LOPES, J. R. F.; DANTAS, M. P.; FERREIRA, F. E. P. Variabilidade da precipitação pluvial e produtividade do milho no semiárido brasileiro através da análise multivariada. **Nativa**, Sinop, v. 7, n. 1, p. 77-83, jan./fev. 2019. DOI: https://doi.org/10.31413/nativa.v7i1.6243.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MCBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4. Acesso em: 10 jun. 2025.

MOLIN, J.P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, v.22, p.83-92, 2002.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Relação entre atributos do solo e a produtividade de grãos em sistema de plantio direto. **Revista de Agricultura**, Jaboticabal, v. 91, n. 1, p. 1–16, 2016.

MULLA, D. J. Spatial variability in precision agriculture. In: SHEKHAR, S.; XIONG, H.; ZHOU, X. (ed.). **Encyclopedia of GIS**. Springer, 2017. p. 2118–2125. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-17885-1_1652. Acesso em: 10 jun. 2025.

NALIN, R. S. et al. Accounting for the spatial variation of phosphorus available explained by environmental covariates. **Geoderma Regional**, v. 32, e00594, 2023.

OLIVEIRA, L. A. et al. Fertilidade e manejo químico de solos do Rio Grande do Sul: desafios e perspectivas. **Ciência Rural**, v. 50, n. 2, 2020.

PACCIORETTI, P. et al. paar: **Precision Agriculture Data Analysis**. R package version 1.0.1. 2024. Disponível em: https://CRAN.R-project.org/package=paar R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. 2022. Disponível: https://www.R-project.org/. RAIJ, B. van et al. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: IAC, 2001.

RESENDE, A. V.; BORGHI, E.; GONTIJO-NETO, M. M.; ABREU, S. C.; SANTOS, F. C.; COELHO, A. M. Manejo de nutrientes no cultivo de milho segunda safra na região do Cerrado. **Revista Plantio Direto & Tecnologia Agrícola**, v. 28, n. 1, p. 19-29, 2018.

ISBN 978-65-990392-6-3

SANTOS, H.G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. − Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p SILVA, F. A. O. et al. Variabilidade espacial da profundidade do solo em áreas agrícolas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 53, n. 1, 2018.

SCHREINER-MCGRAW, A. P., BAFFAUT, C. Quantifying links between topsoil depth, plant water use, and yield in a rainfed maize field in the US Midwest. **Agricultural Water Management,** 290, 108569, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108569

SILVA, F. S.; SILVA, S. D.; MELO, L. F. S. Elaboração de mapas de fertilidade do solo para gestão de pequenas propriedades no norte do Tocantins. In: **JORNADA DA INICIAÇÃO CIENTÍFICA E EXTENSÃO**, 8., 2017, Palmas. Anais... Palmas: IFTO, 2017. Disponível em: http://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/jice/8jice/paper/viewFile/8644/3839. Acesso em: 10 jun. 2025.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 3 ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Emater/RSAscar, 2018. 252 p.

SILVA, R. R.; SARTORI, M. G. B. (in memoriam); WOLLMANN, C. A. Relação entre precipitação pluviométrica e produtividade da cultura de soja no município de Ibirubá-RS. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 27, p. 296-314, 2014.

TAGLIAPIETRA, E.L. et al. **Ecofisiologia da soja: visando altas produtividades**. 2 ed. Santa Maria-RS, Pallotti. 2022. 432p.

XU, G. et al. Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. **The Crop Journal, Beijing**, v. 9, n. 2, p. 249-256, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.10.005. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214514120301732. Acesso em: 11 ago. 2025.

ZHANG, L., HUANG, Y., RONG, L. Xingwu, D., Zhang, R., Li, Y., Guan, J. Efeito da profundidade da erosão do solo na produtividade agrícola com base no método de remoção da camada superficial do solo: uma meta-análise. **Agronomy for Sustainable Development**, 41, 63, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s13593-021-00718-8

ISBN 978-65-990392-6-3



ÁREA TEMÁTICA: GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À AGRICULTURA DE PRECISÃO

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 45

CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E TEOR DE CLOROFILA EM PLANTIO DE *EUCALYPTUS SALIGNA* SM SOB CONDIÇÃO DE ESTRESSE ABIÓTICO

Correlation between vegetation indices and chlorophyll content in Eucalyptus saligna Sm plantations under abiotic stress conditions

Sally Deborah Pereira da Silva[1]; Lúcio de Paula Amaral[1,4]; Gustavo Vedooto Ferreira[1]; Regiane Aparecida Ferreira[2]; Norton Borges Junior[1,3]; Telmo Jorge Carneiro Amado[4]

[1] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal – Universidade Federal de Santa Maria/UFSM, Avenida Roraima n.º 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria — RS, Brasil, sallydeborah@outlook.com, amaralufsm@gmail.com; engflorestalgustavovedootof@gmail.com, norton.borges@cmpcrs.com.br

[2] Eng. Florestal, Mestre em Agricultura de Precisão, PPGAP/UFSM, Avenida Roraima n.º 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria — RS, Brasil, regianeferreira1891@gmail.com

[3] Pesquisador da empresa florestal CMPC Brasil, Guaíba-RS, PPGEF/UFSM, UFSM, e-mail: norton.borges@cmpcrs.com.br

[4] Professor, Programa de Pós-graduação em Agricultura de Precisão - Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria/UFSM, Avenida Roraima n.º 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria — RS, Brasil, proftelmoamado@gmail.com, amaralufsm@gmail.com

RESUMO

O objetivo do estudo é correlacionar diferentes Índices de Vegetação (IVs) obtidos por sensoriamento remoto proximal com o teor de clorofila em plantas saudáveis e estressadas de *Eucalyptus saligna*. O experimento foi conduzido em plantio clonal localizado no município de Caçapava do Sul, estado do Rio Grande do Sul. Foram selecionadas 30 plantas, sendo 15 saudáveis e 15 sob estresse associado à má formação radicular. As leituras espectrais foram realizadas com espectrorradiômetro portátil no intervalo de 325 a 1075 nm. Os IVs calculados foram NDVI, NDRE, CCCI e PSRI. O teor de clorofila foi medido com clorofilômetro SPAD. Os dados foram submetidos à estatística descritiva, teste t e correlação de Pearson. Os resultados mostraram valores médios mais elevados de NDVI, NDRE, CCCI e clorofila nas plantas saudáveis, enquanto o PSRI foi superior nas plantas estressadas. Os IVs avaliados apresentaram bons resultados para monitorar o estresse, com potencial aplicação em levantamentos por sensores embarcados em aeronaves remotamente pilotadas (ARP).

Palavras-chave: Má formação das raízes. Sensoriamento remoto. Saúde florestal.

ABSTRACT

The objective of this study is to correlate different Vegetation Indices (VIs) obtained by proximal remote sensing with the chlorophyll content of healthy and stressed Eucalyptus saligna plants. The experiment was conducted in a clonal plantation located in the municipality of Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul state. Thirty plants were selected, 15 healthy and 15 under stress associated with poor root formation. Spectral readings were taken with a portable spectroradiometer in the 325-1075 nm range. The calculated VIs was NDVI, NDRE, CCCI, and PSRI. Chlorophyll content was measured with a SPAD chlorophyll meter. The data were subjected to descriptive statistics, t-test, and Pearson's correlation. The results showed higher mean values of NDVI, NDRE, CCCI, and chlorophyll in healthy plants, while PSRI was higher in stressed plants. The evaluated IVs showed good results for monitoring stress, with potential application in surveys using sensors on board remotely piloted aircraft (RPA).

Keywords: Poor root formation. Remote sensing. Forest health.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

A espécie *Eucalyptus saligna* Sm. é amplamente utilizada em plantios comerciais na região Sul do Brasil devido às suas características favoráveis, como elevada produtividade, rápido crescimento, fácil adaptação a diferentes condições ambientais e resistência a geadas, o que a torna uma opção valiosa para áreas com invernos de baixas temperaturas (KIKUTI e NAMIKAWA, 1990). No estado do Rio Grande do Sul (RS), onde predomina seu cultivo, é comum a ocorrência de plantas estressadas, em decorrência de fatores bióticos e abióticos.

Especificamente em plantios de *E. saligna* cultivados no RS, tem sido registrado problemas de adaptação em determinados clones, resultando em queda da produtividade, danos irreversíveis aos plantios e impactos negativos ao setor. Esse fenômeno caracteriza-se como um estresse abiótico (doenças abióticas) que compromete o desenvolvimento anatômico das plantas, afetando especialmente o sistema radicular (MAFIA et al., 2023). Ainda de acordo com Mafia et al. (2023), as ocorrências correspondem a uma desordem no crescimento e no desenvolvimento das raízes. As plantas afetadas apresentam sintomas variados, como sistema radicular atrofiado e raízes superficiais enoveladas. Tais distúrbios reduzem a capacidade de absorção de água e nutrientes, ocasionando um quadro sintomatológico típico de deficiência hídrica e/ou nutricional, decorrente do desequilíbrio entre o sistema radicular e a parte aérea.

Dessa forma, sob condições de estresse, as plantas apresentam alterações morfológicas, fisiológicas e metabólicas que permitem reconhecer e reagir a fatores ambientais adversos, resultando em mudanças no crescimento (KOLLIST et al., 2019). Essas alterações afetam diretamente a reflectância do dossel e das folhas, possibilitando a identificação do estado de saúde e a detecção do estresse vegetal por sensoriamento remoto (SR), em diferentes escalas (orbital, suborbital e proximal) (FORMAGGIO e SANCHES, 2017).

Com base nessas respostas fisiológicas, o SR permite derivar Índices de Vegetação (IV), que consistem em transformações espectrais de duas ou mais bandas e destacam características da vegetação, facilitando comparações espaciais e temporais da atividade fotossintética, incrementos de biomassa e da estrutura do dossel (ZANZARINI et al., 2013). Segundo Ponzoni e Shimabukuro (2012), os IV servem como parâmetros indicativos de crescimento e vitalidade, contribuindo para análises de atributos biofísicos, biomassa, cobertura do solo, índice foliar, produtividade e atividade fotossintética.

Os IVs também permitem estimar o teor de clorofila, fundamental na avaliação do estresse vegetal. O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) é amplamente utilizado para derivar parâmetros biofísicos das plantas a partir da partir da relação entre as faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo (ROUSE et al., 1974). Barnes et al. (2000) desenvolveram o Índice de Borda Vermelha de Diferença Normalizada (NDRE).

Além dos sensores remotos, o teor de clorofila pode ser obtido de forma indireta e não destrutiva com o uso de clorofilômetros, que se baseiam nas propriedades ópticas das folhas (ARGENTA et al., 2001). Esses sensores ópticos medem a absorbância diferencial e a transmitância em diferentes comprimentos de onda, permitindo estimar rapidamente o conteúdo relativo de clorofila sem necessidade de remoção da folha.

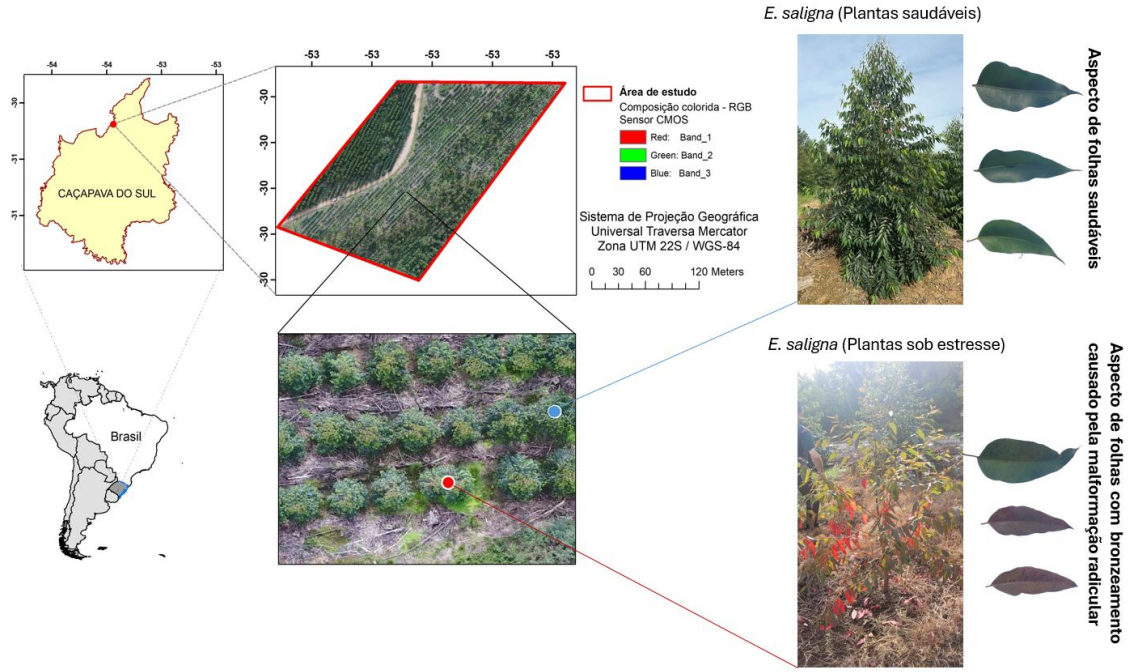
Nesse contexto, este estudo tem como objetivo correlacionar diferentes Índices de Vegetação, obtidos por sensoriamento remoto proximal, com o teor de clorofila em plantas saudáveis e estressadas de *Eucalyptus saligna*, sendo o estresse abiótico associado ao distúrbio da malformação radicular, em plantios clonais comerciais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde a um talhão florestal comercial da empresa CMPC do Brasil, Projeto Santa Bárbara, localizado no distrito de Forninho, zona rural de Caçapava do Sul, região da Campanha no estado do Rio Grande do Sul. A área possui as coordenadas de referência -30,337236 de latitude Sul, -53,465954 de longitude Oeste, altitude aproximada de 90 metros (Figura 1).

Figura 1 - Localização da área de estudo, e exemplos de plantas saudáveis e estressadas em plantio clonal de *E. saligna*, Projeto Santa Bárbara/CMPC, Caçapava do Sul-RS, Brasil.



Fonte: Autores (2025).

Trata-se de um talhão em rotação de ciclo de produção, replantado com mudas clonais de *E. saligna*, com oito meses de idade, espaçamento de 3,5 x 2,14 m, sendo a linha de plantio preparada no conceito de cultivo mínimo, com subsolagem e formação de camalhão. O clima da região é classificado como subtropical úmido (Cfa), com temperatura média anual superior a 18ºC, e média pluviométrica de 1650 mm por ano (ALVARES et al., 2013). Os solos são identificados como Argissolos Vermelhos Alumínicos (PVa) (EMBRAPA, 2018).

2.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS DE CAMPO

Como primeira etapa de campo, buscou-se verificar o comportamento espectral de plantas saudáveis e estressadas. Para isso, as árvores foram classificadas em duas classes representativas de estado de saúde:

- Plantas saudáveis: caracterizadas por folhas verdes, crescimento vigoroso e uniforme, tronco reto sem deformações e sistema radicular bem desenvolvido;
- Plantas sob estresse (sintomáticas da malformação do sistema radicular): folhas com aspecto marrom avermelhada, menor densidade de copa, redução no crescimento, espessamento de colo, suscetíveis a tombamento ou a quebra do fuste.

Ao longo do talhão, foram identificadas aleatoriamente 15 indivíduos de *E. saligna* saudáveis e 15 sob estresse. Essas plantas foram utilizadas para realizar leituras espectrais

ISBN 978-65-990392-6-3

com espectrorradiômetro portátil na copa e medir o teor médio de clorofila com clorofilômetro, nas folhas do terço médio da copa.

A coleta dos dados de reflectância de plantas de *E. saligna* foram realizadas com um espectrorradiômetro portátil *FieldSpec Hand Held* 2 VNIR ASD, com resolução espectral de 325 a 1075 nm e intervalo de 1 nm, registrando 10 leituras por planta. A metodologia foi adaptada de Ferreira et al. (2023), realizando cinco leituras em cada face voltada para as entrelinhas, considerando a diferença de exposição solar.

As medições foram feitas a 1,0 m de distância, com o espectrorradiômetro inclinado em aproximadamente 45°, direcionado à porção mediana da copa, de forma a captar a reflectância de folhas maduras fisiologicamente, evitando folhas jovens ou senescentes. Esse procedimento também se justificou pela altura das plantas, que impossibilitou posicionar o sensor em ângulo nadiral.

A calibração do espectrorradiômetro foi realizada com placa de calibração para reflectância, que se comporta como uma superfície lambertiana. Os horários das medições em campo variaram entre as 10:30 e 12:30 horas, período de menor ângulo de inclinação solar e maior fluxo de energia radiante, com condições meteorológicas que apresentavam uma certa nebulosidade, o que exigiu maior periodicidade na realização de calibrações ao longo da coleta de dados.

Concomitantemente às leituras espectrais, foi determinado o teor médio de clorofila de cada planta. Para isso, coletaram-se medições em cinco folhas do terço médio, em cada face voltada para as entrelinhas, utilizando um clorofilômetro portátil SPAD de leitura instantânea. Esse equipamento calcula os valores com base na quantidade de luz transmitida pela folha em dois comprimentos de onda com diferentes níveis de absorbância da clorofila (MINOLTA, 1989).

As medições são realizadas por diodos emissores de luz nos comprimentos de onda de 650 a 940 nm; a luz transmitida é captada por um receptor, que converte o sinal elétrico em valores digitais denominados valores SPAD. Os dados foram gerados imediatamente no campo e registrados em fichas de anotação. O valor SPAD foi calculado conforme a equação 1 (KONICA MINOLTA, INC., 2009).

$$Valor\ SPAD = \left(\left(\frac{I_{650}}{I_{940}}\right) sem\ folha - \left(\frac{I_{650}}{I_{940}}\right) com\ folha\right) \quad \text{(EQ. 1)}$$

Onde: Valor SPAD = Teor relativo de clorofila %; I_{650} = comprimento de onda do vermelho; I_{940} = comprimento de onda do infravermelho próximo.

2.3 PROCESSAMENTO DE DADOS

Os dados foram descarregados do espectrorradiômetro com o programa *HH2 Sync ASD*, que possibilita acessar os arquivos no equipamento e salvá-los no computador. Com o programa *ViewSpecPro ASD*, foram acessados os arquivos de dados, convertidos para reflectância e exportados em arquivo de texto no formato *.csv* separado por vírgula. Os dados exportados foram levados para planilha eletrônica, sendo organizados e obtidas as curvas de reflectância, desconsiderando as regiões com ruídos, detectadas visualmente nos extremos das curvas (parte das regiões do azul e infravermelho próximo, respectivamente).

Foram delimitadas as bandas de referência azul – 475 nm ± 40 nm; verde – 560 nm ± 20 nm; vermelho – 668 nm ± 10 nm; borda do vermelho *(Red Edge)* – 717 nm ± 10 nm; infravermelho próximo *(NIR)* – 840 nm ± 40 nm, tendo por base o sensor multiespectral *RedEdge-MX Micasens*e, a ser utilizado em levantamentos futuros.

A partir dos dados de reflectância delimitados, foram calculados quatro IVs, selecionados com base em estudos prévios, considerando a comprovada correlação com diferentes sintomas de estresse (DASH et al., 2017; DUARTE et al., 2020). Os IVs *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Normalized Difference Red Edge Index* (NDRE), *Canopy Chlorophyll Content Index (*CCCI) e *Plant Senescing Reflectance Index* (PSRI), fundamentados nas variações de absorção de clorofila, carotenoides e outros pigmentos vegetais, foram empregados conforme suas aplicações, como estimar vigor e biomassa; para monitorar variações de conteúdo de clorofila e estresse em estágios médios/avançados, com menor saturação que o NDVI; teor relativo de clorofila e diagnóstico nutricional, especialmente de nitrogênio; Identificar senescência foliar e acúmulo de carotenoides, útil no monitoramento de maturação e estresse fisiológico. (Tab.

Tabela 1 - Índices de vegetação utilizados no estudo.

Índices de Vegetação	Fórmula	Referência
NDVI	$\frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}}$	Rouse *et al*. (1974)
NDRE	$\frac{R_{NIR} - R_{REDEDGE}}{R_{NIR} + R_{REDEDGE}}$	Barnes *et al*. (2000)
CCCI	$\frac{R_{NIR} - R_{REDEDGE}/R_{NIR} + R_{REDEDGE}}{R_{NIR} - R_{RED}/R_{NIR} + R_{RED}}$	Barnes *et al*. (2000)
PSRI	$\frac{R_{RED} - R_{GREEN}}{R_{REDEDGE}}$	Merzlyak *et al*. (1999).

2.4 ANÁLISE ESTATISTICA

Inicialmente, foi realizada a estatística descritiva e o teste t ao nível de significância de 5% (α = 0,05). Os dados foram submetidos ao teste de normalidade dos erros (Shapiro-Wilk), com nível de significância de 5% (p > 0,05).

Em seguida, procedeu-se à análise de correlação de Pearson entre as duas classes de plantas, o teor de clorofila e os índices de vegetação, com o objetivo de avaliar a relação linear entre essas variáveis.

Na correlação de Pearson, coeficientes positivos indicam que, à medida que uma variável aumenta, a outra tende a aumentar proporcionalmente. Coeficientes negativos indicam que o aumento de uma variável está associado à redução da outra (BERMAN, 2016). As correlações foram classificadas conforme os seguintes intervalos de magnitude:

- 0,9 ≤ | r | ≤ 1,0 significam correlação muito forte;
- 0,7 ≤ | r | < 0,9 representam correlação forte;
- 0,4 ≤ | r | < 0,7 representam correlação moderada;
- 0,2 ≤ | r | < 0,4 significam correlação fraca;
- 0,0 ≤ | r | < 0,2 representam correlação muito fraca.

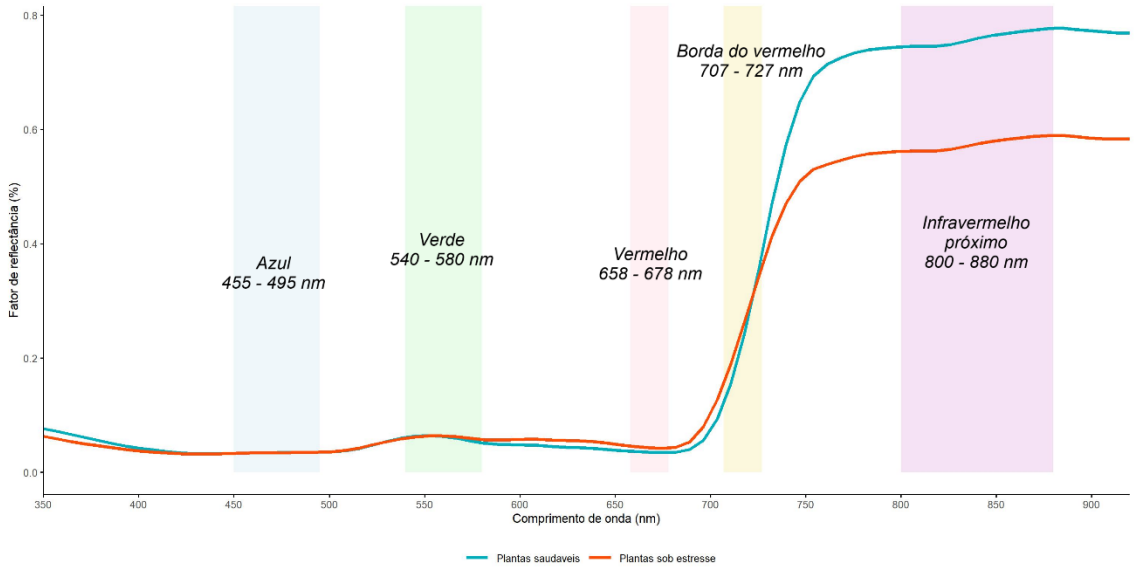
As análises estatísticas foram realizadas no *software* RStudio, versão 3.5.0 (R Core Team, 2021), com utilização do pacote estatístico *ExpDes* (FERREIRA et al., 2014).

ISBN 978-65-990392-6-3

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 2 ilustra as curcas de reflectância de reflectância típicas de E. saligna, sob condição saudável e estressada.

Figura 2 - Comportamento espectral de plantas saudáveis e estressadas em plantio clonal de *E. saligna*, Projeto Santa Bárbara/CMPC, junho de 2024, Caçapava do Sul-RS, Brasil.



Fonte: Autores (2025).

Nota-se diferenças marcantes entre plantas saudáveis e sob estresse, sobretudo no infravermelho próximo (800–880 nm), onde as plantas saudáveis apresentaram patamar de reflectância mais elevado, o que indica maior integridade estrutural do mesófilo foliar (Ponzoni et al., 2012). Plantas sob estresse exibiram redução na reflectância nessa faixa, que podem estar relacionadas a degradação celular e diminuição do espalhamento múltiplo. Adicionalmente, observou-se aumento relativo da reflectância no vermelho (658–678 nm) e menor declividade na borda do vermelho (707–727 nm) para plantas estressadas, atribuídos à redução do teor de clorofila e consequente perda de vigor fisiológico. Esses comportamentos foram evidenciados nas curvas de reflectância média obtidas no estudo de Silva et al. (2024).

Resultados semelhantes foram observados em Goez et al. (2024), onde a reflectância no infravermelho próximo em milho, feijão e abacate sob diferentes estresses abióticos, foram associadas à perda de integridade celular e redução do índice de área foliar. Os autores também destacaram que a análise de toda a assinatura espectral, incluindo a região do red-edge, aumenta a acurácia na detecção de estresse em comparação ao uso isolado de IVs.

O valor médio do índice de clorofila nos indivíduos saudáveis foi de 58,46%. A Tabela 2 apresenta o resumo dos dados dessa classe. De forma geral, as medições mostraram variação reduzida entre os valores mínimo e máximo, principalmente para NDVI e clorofila, que tiveram os menores coeficientes de variação (CV). As médias e medianas ficaram próximas em todas as variáveis, o que indica uma distribuição sem grandes variações. Os testes de normalidade confirmaram distribuição normal dos dados, com $p > 0,05$ para todas as variáveis analisadas.

Tabela 2 – Estatística descritiva da classe de plantas saudáveis usados na pesquisa.

	Teor de Clorofila (%)	NDVI	NDRE	CCCI	PSRI
Média	58,46	0,9111	0,5322	0,5838	-0,1002
Mediana	58,90	0,9127	0,5327	0,5818	-0,0965
Desvio Padão	2,81	0,0149	0,0413	0,0394	0,0210
Mínimo	50,70	0,8834	0,4575	0,4989	-0,1511
Máximo	61,50	0,9405	0,6089	0,6474	-0,0733
CV (%)	4,81	1,63	7,76	6,74	20,91
Shapiro-Wilk *p*	$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p > 0,05$

Fonte: Autores (2025).

O valor médio do índice de clorofila nos indivíduos sob estresse foi de 46,86%. A Tabela 3 apresenta o resumo dos dados dessa classe. Observa-se maior variação entre os valores mínimos e máximos em comparação aos indivíduos saudáveis, principalmente no teor de clorofila e no índice PSRI, que apresentou o maior coeficiente de variação. Apesar disso, as médias e medianas permaneceram próximas, indicando distribuição relativamente equilibrada. Os testes de normalidade não indicaram desvios significativos, pois todos os valores apresentaram $p > 0,05$.

Tabela 3 – Estatística descritiva da classe de plantas sob estresse usados na pesquisa.

	Teor de Clorofila (%)	NDVI	NDRE	CCCI	PSRI
Média	46,86	0,8573	0,3871	0,4515	-0,0673
Mediana	48,40	0,8542	0,3819	0,4501	-0,0617
Desvio Padão	4,80	0,0184	0,0281	0,0308	0,0199
Mínimo	38,90	0,8200	0,3409	0,3949	-0,1049
Máximo	53,90	0,8939	0,4368	0,5069	-0,0368
CV (%)	10,24	2,15	7,25	6,83	29,53
Shapiro-Wilk *p*	$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p > 0,05$

Fonte: Autores (2025).

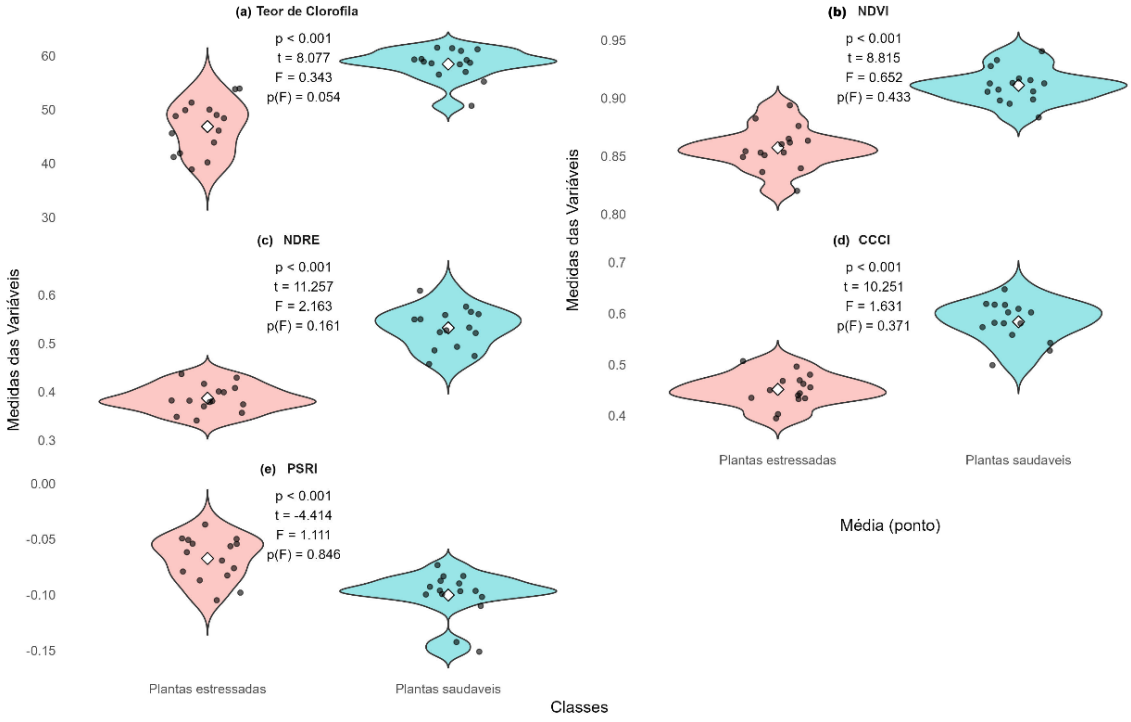
Os valores das estatísticas t e F demonstraram que houve diferenças significativas, onde a classe de plantas saudáveis foi superior as estressadas para todas as variáveis avaliadas (Figura 3). Esses resultados indicam que os IVs e teor de clorofila foram sensíveis para discriminar o estado fisiológico das plantas de *E. saligna*. De modo geral, o teor médio de clorofila (Fig. 3 – a), foi consideravelmente superior nas plantas saudáveis, apresentando menor dispersão entre os indivíduos, o que indica maior uniformidade fisiológica e menor influência de fatores de estresse.

ISBN 978-65-990392-6-3

Conforme Argenta et al. (2001), é importante estimar com precisão o conteúdo de clorofila foliar, a determinação do teor relativo de clorofila por meio do clorofilômetro é utilizada para predizer a necessidade de adubação nitrogenada em várias culturas.

O NDVI (Fig. 3 – b), mostrou valores médios mais elevados no grupo saudável, refletindo maior vigor vegetativo e maior quantidade de biomassa ativa. Mesmo sendo capaz de diferenciar os grupos de plantas, valores altos e estagnados de NDVI costumam indicar saturação do índice, causada pela forte absorção da radiação eletromagnética (REM) pelas clorofilas na região do vermelho, no dossel da vegetação.

Figura 3 - Resultados do teste t para comparação estatística entre plantas de *E. saligna* saudáveis e sob estresse, quanto ao teor de clorofila e índices de vegetação.



Fonte: Autores (2025).

O índice NDRE (Fig. 3 – c), também apresentou médias superiores nas plantas saudáveis e distribuição mais concentrada no gráfico de violino, o que sugere maior concentração de clorofila e melhor condição nutricional. Eitel et al. (2010), com o objetivo de verificar se a disponibilidade adicional de informações de reflectância da borda do vermelho melhoraria o AGORS de estresse em mudas de *Pinus sylvestris*, cultivadas em viveiro. Os autoresconstataram que ao utilizar a região da borda do vermelho, houve um aumento significativo na capacidade de estimar variações no teor de clorofila (R^2 = 0,57) em comparação com a banda vermelha. Isso possibilita que esta faixa discrimine áreas afetadas por doenças e outros estressores nas culturas.

O CCCI, originalmente desenvolvido para diagnóstico de nitrogênio em algodão (BARNES et al., 2000), também exibiu valores mais altos no grupo saudável (Fig. 3 – d), corroborando a associação entre o índice e a eficiência fotossintética. Esse comportamento é coerente com diversos estudos que apontam esse IV como altamente sensível ao conteúdo de clorofila e, por consequência, ao nitrogênio foliar (BARNES et al., 2000; OLIVEIRA et al., 2017; SINGH et al., 2019).

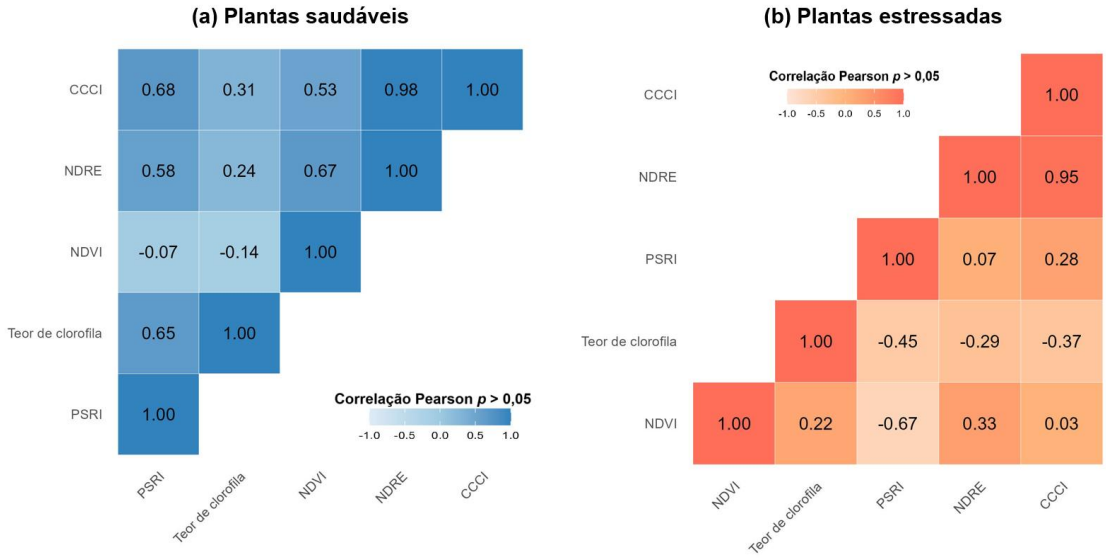
Em relação ao PSRI (Fig. 3 – e), observou-se que as plantas saudáveis apresentaram valores médios mais negativos, característicos de folhas com maior teor de pigmentos fotossintéticos e menor grau de senescência (teor de clorofilas alto e baixo teor de

ISBN 978-65-990392-6-3

carotenoides), enquanto as plantas estressadas concentraram valores mais próximos de zero, sugerindo redução da atividade fotossintética e início de degradação de pigmentos fotossintéticos e acúmulo de carotenoides. O PSRI apresenta sensibilidade semelhante à do NDVI, porém é direcionado à detecção dos teores de carotenoides, como o alfacaroteno e betacaroteno. Seus valores variam de -1 a 1, tendendo a aumentar para valores positivos durante o processo de senescência foliar, à medida que o teor relativo de carotenoides supera o de clorofilas. Valores menos negativos do índice, como o observado para a classe de plantas estressadas, geralmente indicam presença significativa de carotenoides, alterando a relação carotenoide/clorofila (MERZLYAK et al., 1999; REN, CHEN e AN, 2017).

A matriz de correlação de Pearson para a classe de plantas saudáveis e sob estresse, e os IVs correlacionados com os teores relativos de clorofila, está apresentada na Figura 4.

Figura 4 -Matriz de Correlação de Pearson entre o Teor de clorofila e os índices de vegetação, de plantas de *E. saligna* em condição saudável (a) e sob estresse (b).



Fonte: Autores (2025).

A análise das correlações de Pearson entre o teor de clorofila e os IVs, apresentou resultados distintos para plantas saudáveis e estressadas, devido principalmente às alterações fisiológicas associadas às condições de estresse.

Para as plantas saudáveis, observou-se correlação moderada entre o teor de clorofila e o índice PSRI (0,65; $p > 0,05$) e correlação fraca com o índice CCCI (0,31; $p > 0,05$). Esse comportamento pode estar associado à sensibilidade específica do PSRI em relação à proporção entre carotenoides e clorofilas (MERZLYAK et al., 1999; SIMS e GAMON, 2002). Em contrapartida, a correlação entre o NDVI e o teor de clorofila foi negativa e muito fraca (-0,14; $p > 0,05$), sugerindo que, em condições normais, o NDVI pode saturar em áreas de vegetação densa e não refletir as variações sutis na concentração de clorofila (GITELSON et al., 2003).

Nas plantas estressadas, observou-se uma inversão significativa nas correlações. O índice PSRI apresentou correlação negativa moderada (-0,45; $p > 0,05$), o que reforça sua sensibilidade à degradação ou redução dos pigmentos de clorofila quando a planta entra em estresse ou senescência, uma vez que, à medida que a clorofila diminui, os valores de PSRI aumentam, tornando-se menos negativos ou positivos (MERZLYAK et al., 1999). Já o NDVI apresentou correlação positiva fraca (0,22; $p > 0,05$), possivelmente em razão da limitada capacidade em representar alterações nos pigmentos fotossintéticos em condições de estresse, conforme relatado por Penuelas, Barret e Filella (1995) e Gitelson et al. (2003).

ISBN 978-65-990392-6-3

Uma diversidade IVs foram desenvolvidos para estimar a clorofila, com diferentes graus de eficácia e precisão. A relevância e os limites dos resultados observados no presente estudo se inserem em um contexto mais amplo de selecionar IVs que estimem com robustez os níveis de clorofila. IVs clássicos de banda dupla, como o índice de razão simples (Jordan, 1969) e o próprio NDVI, têm potencial para prever o conteúdo de clorofila, mas são afetados por fatores como o IAF, brilho do solo e baixa sensibilidade a variações pigmentares (GAO et al., 2024).

Mesmo com o uso contínuo e generalizado desses índices, persistem desafios importantes nas correlações e estimativas precisa do teor de clorofila a partir de dados espectrais. Fatores externos como o material de fundo e a geometria sensor-solo-sol introduzem variações adicionais que dificultam a recuperação robusta da clorofila, mesmo em levantamentos de campo de alta resolução espectral. Por fim, o fenômeno de saturação representa um obstáculo relevante, pois muitos IVs tendem a perder sensibilidade em condições de moderada a alta concentração de pigmentos (GAO et al., 2023; XU et al., 2019).

Muitos estudos têm avaliado o desempenho dos IVs e apontado lacunas no entendimento e na aplicabilidade de cada índice (SABERIOON et al., 2014; LI et al., 2020; SUN et al., 2021). Entretanto, a definição de um IV ideal para estimar o teor de clorofila de forma consistente ainda é incerta, e carece de mais avaliações para estabelecer recomendações universais (GAO et al., 2024).

Os resultados da correlação entre esses IVs e o teor relativo de clorofila medido pelo clorofilômetro, neste estudo, corroboram essa perspectiva, evidenciando que a escolha do índice deve considerar o estado fisiológico das plantas e as limitações específicas de cada métrica espectral.

Em suma, os IVs obtidos por espectrorradiometria de campo, podem ter sido influenciados pela forma de uso do espectrorradiômetro, sem controle da contaminação de reflectância do solo, outras plantas e resíduos (o módulo de clipagem - *Plant probe with leaf clip*, não estava disponível). Com o módulo de clipagem, que torna o equipamento um sensor ativo, a reflectância das folhas pode ser capturada sem contaminação externa.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que tanto os IVs quanto as medições do teor relativo de clorofila foram sensíveis para discriminar o estado fisiológico de plantas de *E. saligna* submetidas a condições de estresse relacionado aos sintomas da má formação do sistema radicular. Os valores mais altos de NDVI, NDRE, CCCI e teor de clorofila observados nas plantas saudáveis indicam maior vigor vegetativo e eficiência fotossintética.

A escolha do índice deve considerar não apenas a espécie e a fase fenológica, mas também o tipo e a intensidade do estresse, dado que as correlações entre IVs e clorofila variaram substancialmente entre as condições avaliadas.

Ressalta-se a importância dos estudos da caracterização espectral de plantas individuais em condições saudáveis e sob estresse, pois servirão de base para treinamento e validação de metodologias voltadas para mapeamento de estresse em plantios comerciais de eucalipto, podendo configurar uma importante ferramenta na silvicultura de precisão.

Por fim, recomenda-se a realização de outros estudos que integrem dados obtidos por sensores embarcados em aeronaves remotamente pilotadas, visando gerar reflectância e índices de vegetação preferencialmente nas regiões espectrais mais sensíveis à concentração de clorofila, de modo a ampliar a escala e a frequência das coletas com alta precisão espacial.

ISBN 978-65-990392-6-3

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal e à CAPES pela disponibilidade de bolsa de doutorado e diária (PROAP) - Código de Financiamento 001. Ao projeto Advanced Farm e projeto Aquarius, da Universidade Federal de Santa Maria, e à empresa CMPC do Brasil pela disponibilidade da área de estudo e liberação do uso de dados para esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ARGENTA, Gilber et al. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, p. 158-167, 2001. https://doi.org/10.1590/S0103-31312001000200005

BARNES, E. M. et al. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. In: **Proceedings of the fifth international conference on precision agriculture, Bloomington, MN, USA**. 2000.

BERMAN, Jules J. Chapter 4—Understanding your data. **Data simplification**, p. 135-187, 2016. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803781-2.00004-7

DASH, Jonathan P. et al. Assessing very high-resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 131, p. 1-14, 2017.

DUARTE, André et al. Detection of longhorned borer attack and assessment in eucalyptus plantations using UAV imagery. **Remote Sensing**, v. 12, n. 19, p. 3153, 2020.

EITEL, Jan UH et al. Active ground optical remote sensing for improved monitoring of seedling stress in nurseries. **Sensors**, v. 2, n. 4, p. 2843-2850, 2010. https://doi.org/10.3390/s100402843.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa -SPI; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. 5ª ed. 355p

FERREIRA, Eric B. et al. ExpDes: an R package for ANOVA and experimentais designs. **Applied Mathematics**, v. 5, n. 19, p. 2952, 2014.

FERREIRA, Regiane Aparecida, et al. Análise da variabilidade espacial e zonas de produtividade em vinhedos, no Vale Central Gaúcho. **Revista Nativa**, v. 11, n. 3, 2023. DOI: 10.31413/nat.v11i3.15696.

FORMAGGIO, Roberto.; SANCHES, Ieda Del'Arco. **Sensoriamento remoto em Agricultura**. São Paulo: Editora de Textos, 2017, 285p.

GAO, Si et al. Assessment of remote-sensed vegetation indices for estimating forest chlorophyll concentration. **Ecological Indicators**, v. 162, p. 112001, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112001

GAO, Si et al. Evaluating the saturation effect of vegetation indices in forests using 3D radiative transfer simulations and satellite observations. **Remote Sensing of Environment,** v. 295, p. 113665, 2023. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113665

GITELSON, Anatoly A.; GRITZ, Yuri; MERZLYAK, Mark N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. **Journal of plant physiology**, v. 160, n. 3, p. 271-282, 2003. https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887

GITELSON, Anatoly; MERZLYAK, Mark N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of Aesculus hippocastanum L. and Acer platanoides L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. **Journal of plant physiology**, v. 143, n. 3, p. 286-292, 1994. https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81633-0

GOEZ, Manuel et al. Characterization of Maize, Common Bean, and Avocado Crops under Abiotic Stress Factors Using Spectral Signatures on the Visible to Near-Infrared Spectrum. **Agronomy**, v. 14, n. 10, p. 2228, 2024.

JORDAN, Carl F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, v. 50, n. 4, p. 663-666, 1969. https://doi.org/10.2307/1936256

KIKUTI, P., NAMIKAWA, I. S. Estudo da interação clonexníveis da adubação em *Eucalyptus saligna*. **O papel,** n.3, p.37-44, 1990.

KOLLIST, Hannes et al. Rapid responses to abiotic stress: priming the landscape for the signal transduction network. **Trends in plant science**, v. 24, n. 1, p. 25-37, 2019. 10.1016/j.tplants.2018.10.003

KONICA MINOLTA, INC. **Chlorophyll Meter SPAD-502Plus**. Instruction Manual. BDEDPP: JAPAN, 2009. 22p.

LI, Dong et al. Improved estimation of leaf chlorophyll content of row crops from canopy reflectance spectra through minimizing canopy structural effects and optimizing off-noon observation time. **Remote sensing of environment**, v. 248, p. 111985, 2020. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111985

MERZLYAK, Mark N. et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia plantarum**, v. 106, n. 1, p. 135-141, 1999. https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x

MINOLTA, C. Manual for chlorophyll meter SPAD-502. **Osaka: Minolta Radiometric Instruments Divisions**, 1989.

OLIVEIRA, Luiz Felipe Ramalho de et al. Estimating foliar nitrogen in Eucalyptus using vegetation indexes. **Scientia Agricola**, v. 74, p. 142-147, 2017. https://doi.org/10.1590/1678-992X-2015-0477

PENUELAS, Josep et al. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. **Photosynthetica**, v. 31, n. 2, p. 221-230, 1995.

PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; KUPLICH, Tatiana Mora. **Sensoriamento remoto da vegetação**. Oficina de textos, 2012.

ISBN 978-65-990392-6-3

REN, Shilong; CHEN, Xiaoqiu; AN, Shuai. Assessing plant senescence reflectance index-retrieved vegetation phenology and its spatiotemporal response to climate change in the Inner Mongolian Grassland. **International journal of biometeorology**, v. 61, p. 601-612, 2017. https://doi.org/10.1007/s00484-016-1236-6

ROUSE JR, John W. et al. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md, v. 371, 1974.

SABERIOON, M. M. et al. Assessment of rice leaf chlorophyll content using visible bands at different growth stages at both the leaf and canopy scale**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 32, p. 35-45, 2014. https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.03.018

Silva, Sally Deborah Pereira da. et al. Caracterização espectral para distinção de estresse em *Eucalyptus saligna* Smith. **In: Anais do XII Simpósio de pós-graduação em ciências florestais**. Lages – SC, 2024.

SIMS, Daniel A.; GAMON, John A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. **Remote sensing of environment**, v. 81, n. 2-3, p. 337-354, 2002. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X

SINGH, S. et al. Estimating foliar nitrogen using hyperspectral Vegetation indices in Mentha. **In:** National Conference 'Innovations in Geospatial Technology for Sustainable Development With Special Emphasis on NER. 2019. p. 265-266.

SUN, Qi et al. Improving the retrieval of crop canopy chlorophyll content using vegetation index combinations. **Remote Sensing**, v. 13, n. 3, p. 470, 2021. https://doi.org/10.3390/rs13030470

XU, Mingzhu et al. Retrieving leaf chlorophyll content using a matrix-based vegetation index combination approach. **Remote Sensing of Environment,** v. 224, p. 60-73, 2019. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.039

ZANZARINI, Fabricio V. et al. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 608-614, 2013.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 46

ANÁLISE ESPACIAL DA DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DE PLANTAS DE FEIJÃO UTILIZANDO DOSADOR COM SISTEMA DE ESTEIRA CONDUTORA DE SEMENTES ELETRICAMENTE ATUADA

Spatial Analysis of The Longitudinal Distribution of Bean Plants Using a Doser With An Electrically Activated Seed Conductor System

João Batista da Silva Santos[1]; José Carlos C. Reis[2]; Mateus Santos Ribeiro[3]; Lúcio de Paula Amaral[4]; Vinicius Kaster Marine[5]; Eduardo Leonel Bottega[6]; Igor Madruga[7]

[1 ,7, 3]UFSM, Mestrandos em Agricultura de Precisão, Av. Roraima, 1000 - Camobi, Santa Maria - RS, 97105-000, joao-santos.2@acad.ufsm.com.br;
[2] Eng. Agrônomica IF Goiano. Morrinhos - GO, Brasil 75650-000. jose.carlos.agr7@gmail.com
[4, 6] UFSM, Prof.ºs. Dr., Coordenação do PPGAP, Colégio Politécnico da UFSM, Prédio 70, Bloco F, Sala 211-A, Santa Maria, RS. Brasil, CEP 97.105-900, Camobi, lucio.amaral@ufsm.br; eduardo.bottega@ufsm.br
[5] Ph.D. DEM, Centro de Tecnologia - Av. Roraima, 1000, Prédio 10, Sala 402G 97105-900, Santa Maria – RS, Brasil. vinicius.marini@ufsm.br

RESUMO

Diversos fatores podem ter influência na semeadura. Este trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial da distribuição longitudinal entre plantas de feijão, utilizando um dosador com sistema de esteira condutora de sementes. Foi estabelecida uma malha composta por 70 pontos amostrais georreferenciados. A avaliação foi realizada com as plantas em estádio vegetativo V4. Em cada ponto foi efetuada a contagem das plantas presentes em dez metros lineares, bem como mensurada a distância (X, cm) entre plantas. Avaliou-se a porcentagem de espaçamentos falhos (X>12cm), duplos (X<4cm), aceitáveis (4cm<X<12cm) o coeficiente de variação longitudinal da distribuição e plantas/metro. A dependência espacial foi avaliada pelo programa GS+, versão 7. A variabilidade espacial dos atributos espaçamentos aceitáveis, duplos, falhos e coeficiente de variação longitudinal apresentou dependência espacial classificada como forte, com alcances de 43,00 – 49,10 – 48,40 e 31,30 metros, o desempenho do sistema foi classificado como ótimo, em média 97,05% de espaçamentos aceitáveis.

Palavras-chave: Variabilidade Espacial. Plantabilidade. Semeadura de precisão.

ABSTRACT

Several factors can influence similarity. This study aimed to evaluate the spatial variability of longitudinal distribution among bean plants using a seed meter with a seed conveyor belt system. A grid composed of 70 georeferenced sampling points was established. The evaluation was carried out with plants at the V4 vegetative stage. At each point, the number of plants present ten linear meters was counted, as well as the distance (X, cm) between plants. Typically, the percentage of missing spacing (X>12 cm), double spacing (X<4 cm), acceptable spacing (4 cm<X<12 cm), the coefficient of variation of the longitudinal distribution, and plants/meter were determined. Spatial dependence was assessed using the GS+ program, version 7. The spatial variability of the attributes acceptable, double, faulty spacing and coefficient of longitudinal variation showed strong spatial dependence, with ranges of 43.00 – 49.10 – 48.40 and 31.30 meters. The system performance was classified as excellent, with an average of 97.05% of acceptable spacing.

Keywords: Spatial variability. Plantability. Precision seeding.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

O cultivo do Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é realizado por pequenos à grandes produtores de todas as regiões brasileiras (CTSBF, 2012). A cultura produz um alimento não apenas fundamental no quesito nutricional, mas também imprescindível no ponto de vista social por conta da importância econômica que o mesmo possui (Malaquias Junior; Silva, 2020). A EMBRAPA (2025) sustenta que “Dependendo da região, o plantio de feijão no Brasil é feito ao longo do ano, em três épocas, de tal forma que, em qualquer mês, sempre haverá produção em algum ponto do País, o que contribui para o abastecimento interno e reduz a oscilação dos preços”.

Conforme o 9° levantamento da safra 2024/25 da CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento) a produção estimada foi de 3,2 milhões de toneladas, ou seja, 0,8% acima do resultado da safra anterior, sendo na primeira safra já com a colheita encerrada o volume atingiu 1,1 milhão de toneladas, crescimento de 12,8% sobre a safra colhida em 2023/24.

Segundo Modolo et al. (2011) a principal causa da baixa produtividade do grão do feijão na implantação da cultura, em parte, é a falha no estande, também, assim como nas demais culturas anuais, as operações de semeadura e adubação revestem-se de grande importância, pois eventuais problemas somente serão detectados após a germinação das plantas e seu desenvolvimento, quando a correção, além de difícil e onerosa, compromete a produtividade final da cultura.

De acordo com Neto et al. (2008), a uniformidade de espaçamento entre as plantas distribuídas na linha de semeadura pode influenciar na produtividade das culturas e que plantas distribuídas de forma desuniforme implicam aproveitamento ineficiente dos recursos disponíveis, como luz, água e nutrientes, o que gera competividade entre as plantas.

A etapa de semeadura é considerada como sendo de extrema importância e necessita muita atenção, pois, é um processo em que se ocorrerem erros, não há como contornar sem aumentar os custos de produção (KRZYZANOWSKI, 1991; GARCIA et al., 2011).

O desempenho da semeadora também tem importante influência na formação do estande de plantas. Isso porque seus mecanismos dosadores têm papel essencial para que as sementes sejam distribuídas corretamente nos espaços, sem plantas duplas ou falhas de espaçamento (CORREIA et al., 2014).

A variabilidade dos atributos físicos e químicos dos solos, relevo, plantas, manejo, enfim, de todos os aspectos que podem influenciar o desenvolvimento da cultura, se expressa na colheita através de diferenças na produtividade ao longo da lavoura (MOLIN, 2002). Porém, segundo a teoria das variáveis regionalizadas, essa variabilidade pode carregar consigo uma forte influência dos valores de sua vizinhança (REICHARDT; TIMM, 2012).

O semivariograma, que consiste em uma ferramenta de análise geoestatística que mede a dependência espacial entre pontos de dados coletados em relação à distância dentro de um campo experimental, define os parâmetros fundamentais para a estimativa de valores em locais não amostrados através da técnica de krigagem, e que, posteriormente, torna possível a construção de mapas da distribuição espacial do atributo em estudo na área e determinar o modelo que descreve a variabilidade espacial (DALCHIAVON; CARVALHO, 2012). Portanto, a análise conjunta dos semivariogramas e mapas obtidos através da krigagem permitem o conhecimento da distribuição longitudinal de plantas sendo fundamental para visualizar como foi o desempenho da plantabilidade realizada pelos dosadores de sementes.

O objetivo deste trabalho foi estudar a variabilidade espacial da distribuição longitudinal de plantas de feijão carioca, semeado por dosador com sistema de esteira condutora de sementes eletricamente atuada na região de Morrinhos-GO, pois a hipótese é de que o sistema de esteira condutora eletricamente atuada proporciona maior uniformidade na distribuição longitudinal de plantas em feijão, comparado a sistemas convencionais.

ISBN 978-65-990392-6-3

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido no município de Morrinhos, estado de Goiás, durante a safra 2025/2026, em uma área de 6,3 hectares em área irrigada via pivô central. A área está localizada à 17°45'50,5" S 48°57'19,8" W, com altitude média de 771m. O solo da propriedade é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico. A região possui um clima de savana tropical com invernos secos e verões chuvosos (A_w), de acordo com a classificação climática de Köppen (Alvares et al., 2013). A área tem um histórico de plantio direto, com rotação de culturas como soja, milho, feijão e sorgo.

O conjunto mecanizado utilizado para semeadura da cultura da soja foi composto por uma semeadora-adubadora, marca John Deere, modelo 2100 ano 2022, equipada com 12 linhas espaçadas em 0,50 metros. A semeadora foi tracionada por um trator John Deere, modelo 6165 J, com 165 cv de potência nominal (121,3 kW). A velocidade de semeadura adotada foi de 7 km h^{-1}.

A semeadora foi equipada com a tecnologia Selenium NEO, um dosador pneumático a vácuo, com acionamento elétrico, acoplado a um sistema de esteira condutora de sementes eletricamente atuada para entrega de sementes da J. Assy, que promete distribuir as sementes de forma homogênea no solo em velocidades de até 16 km h^{-1}. Todo o sistema eletrônico, incluindo módulos e chicotes elétricos, foi desenvolvido especificamente para essa tecnologia. Na figura 1 é possível visualizar a tecnologia Selenium Neo.

Figura 1. Dosador com mecanismo de esteira condutora de sementes Selenium Neo.

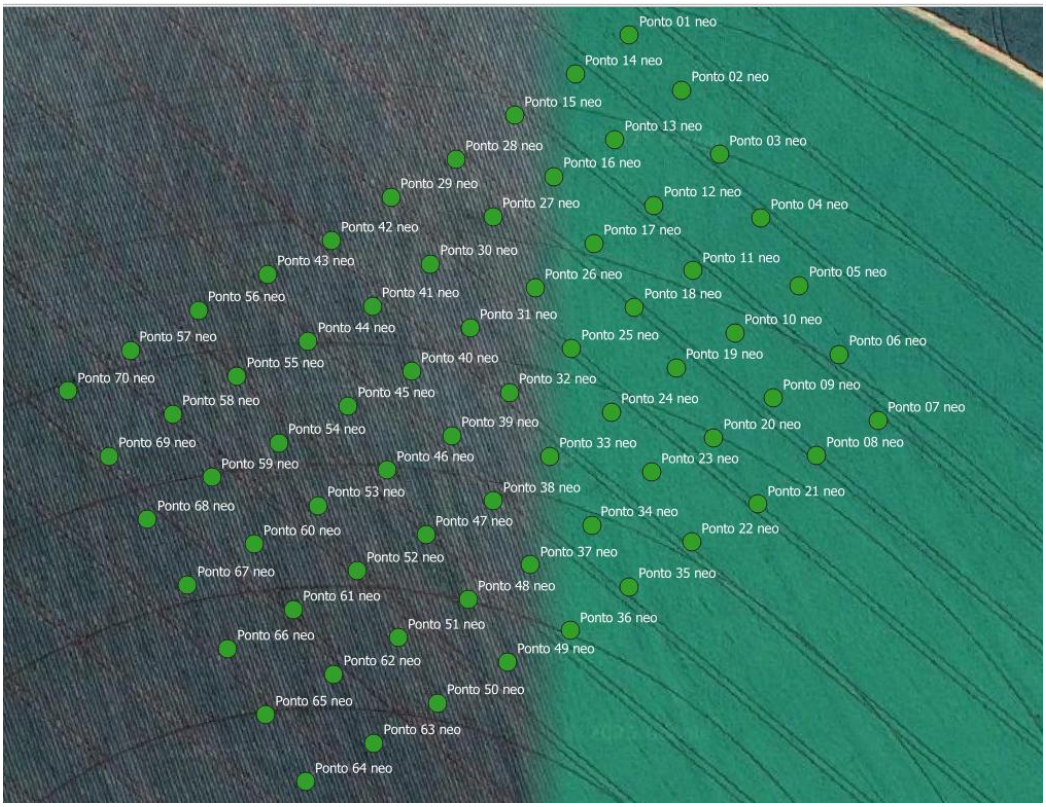


Fonte: Autores (2025).

Para verificação das variáveis em estudo, utilizou-se de 70 pontos amostrais distribuídos na área com malha amostral de aproximadamente 30 metros (Figura 2), sendo a localização geográfica de cada ponto obtida por meio do receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) com uso do aplicativo *Field Area Measure* para coleta das coordenadas em grau decimais. Foi salvo um arquivo KLM com os dados e posteriormente descarregados no software Qgis Versão 3.28.12 para conversão das coordenadas em metros (UTM).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2. Malha amostral composta por 70 pontos.



Fonte: Autores (2025).

Em cada ponto amostral foi efetuada a mensuração da distância entre plantas e plantas por metro presentes em uma linha em cinco metros de comprimento, no estádio vegetativo V4 e os espaçamentos aceitáveis, falhos e duplos (KURACHI et al., 1989) entre as plantas na linha de semeadura.

A partir das medições determinou-se o percentual do coeficiente de variação longitudinal da distribuição de plantas utilizando a seguinte equação 1:

$$CV\% = \frac{Desvio\ Padrão}{Média} * 100 \qquad (1)$$

Fonte: (KARL PEARSON, 1895)

Realizou-se análise estatística descritiva, e calculou-se o coeficiente de correlação de Spearman ($p<0,05$). Posteriormente, realizou-se análise geoestatística utilizando o software GS+ versão 7.

A análise geoestatística foi realizada por meio de semivariogramas experimentais conforme descrito por Vieira (2000), com base nas pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca definida pela equação 2:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \qquad (2)$$

(VIEIRA, 2000)

Em que: = Semivariância em função da distância de separação (h) entre pares de pontos; h = Distância de separação entre pares de pontos, m; N (h) = Número de pares

ISBN 978-65-990392-6-3

experimentais de observações Z(xi) e Z (xi + h) separados por uma distância h.

A escolha dos modelos foi realizada de acordo com o menor valor da soma de quadrados do resíduo (SQR) e o melhor valor do coeficiente de determinação (R^2) testando os modelos linear, exponencial, esférico e gaussiano. Também foi utilizada a validação cruzada para verificar a qualidade dos modelos obtidos, verificando-se o coeficiente angular (valor mais próximo de 1, indica bom modelo), intercepto (valor mais próximo de 0, indica bom modelo) e erro padrão de estimativas (quanto menor, melhor), a presença da maior sobreposição possível das linhas de tendencia que representam valores amostrados em campo e estimados com uso do modelo selecionado e a nuvem de dispersão de pontos formada (presença de baixa dispersão e distribuição acompanhando a diagonalidade das linhas de tendencia). O interpolador utilizado, quando constatada dependência espacial entre os dados, foi a krigagem ordinária pontual.

Do ajuste de um modelo matemático aos dados, o índice de dependência espacial dos atributos (IDE), que é dado por [C/(C0+C)]*100, foi determinado e classificado, segundo Zimback (2001), sendo assim, os seguintes intervalos: dependência espacial baixa para IDE < 25%, moderada para 25% <IDE < 75% e forte para IDE>75%.

A espacialização da variabilidade do Coeficiente de Variação, Plantas por Metro, Espaçamentos Aceitáveis, Falhos e Duplos, foi procedida por meio da construção dos mapas temáticos gerados através do método de interpolação krigagem ordinária pontual.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros da estatística descritiva que caracterizam os dados das variáveis estudadas. Os valores do coeficiente de variação (CV) para as variáveis de espaçamento aceitáveis e plantas por metro foram considerados baixos (CV < 12%), para a variável coeficiente de variação longitudinal foi classificado como médio (12% < CV < 60%) e o CV dos espaçamentos duplos e falhas foram considerados altos, segundo a classificação proposta por WARRICK; NIELSEN (1980).

Tabela 1. Estatística descritiva e teste de normalidade das variáveis estudadas.

Variáveis	Média	Mediana	Variância	Mínimo	Máximo	CV (%)	σ (1)	W (2)
Aceitáveis (%)	97,05	97,40	5,50	90,00	100,00	2,42	2,34	0,91^{ns}
Duplos (%)	0,62	0,00	1,72	0,00	5,10	210,81	1,31	0,52^{ns}
Falhos (%)	2,40	2,50	4,31	0,00	7,90	86,45	2,08	0,88^{ns}
C.V Longitudinal (%)	23,15	22,86	25,15	12,83	40,20	21,66	5,01	0,96^{ns}
Plantas (pl m^{-1})	7,88	7,80	0,05	7,20	8,40	2,91	0,23	0,90^{ns}

(1) Desvio padrão; (2) Teste de normalidade de Shapiro-Wilk (p<0,05); (ns) não significativo, distribuição não normal.
Fonte: Autores (2025).

As variáveis não apresentaram distribuição normal pelo teste de normalidade de Shapiro Wilk's (p>0,05), porém segundo Cressie (1991), a normalidade dos dados não é uma

ISBN 978-65-990392-6-3

exigência da geoestatística, é conveniente apenas que, no gráfico de distribuição normal, as variáveis não apresentem extremidades da distribuição muito alongadas, o que poderia comprometer as análises. Uma vez comprovado que existem variáveis sem distribuição normal dos dados é clara a importância da geoestatística no complemento da estatística clássica, conforme descreve Jakob (1999), para interpretar.

Para MIALHE (1996) é considerada uma semeadura de precisão uma porcentagem de espaçamentos normais/aceitáveis acima de 60%, o que neste experimento obteve um mínimo de 90%, média de 97,07% e máximo de 100% sendo classificado de acordo com Tourino e Klingensteiner (1983) em ótimo desempenho. O critério de avaliação e classificação é baseado no número de espaçamento aceitáveis entre sementes, sendo ótimo desempenho o mecanismo que apresenta de 90 a 100% de espaçamentos aceitáveis; bom desempenho, de 75 a 90%; regular de 50 a 75%; e abaixo de 50% desempenho insatisfatório. Vale ressaltar que esses valores são referentes a ensaios de laboratório, onde não possuem influência de fatores externos que podem afetar os resultados de distribuição de sementes no campo, visto que está pesquisa foi conduzida em campo.

Na análise de correlação de Spearman (Tabela 2), se observou algumas variáveis nas quais foram significativas a 5% de probabilidade. Sendo assim, foram gerados os gráficos de dispersão das correlações que apresentaram significância, conforme a Figura 3.

Tabela 2. Análise de correlação de Spearman entre as variáveis estudadas.

Variáveis	Aceitáveis (%)	Duplos (%)	Falhos (%)	C.V Lon. (%) [1]	Plantas (pl m^{-1})
Aceitáveis (%)	-				
Duplos (%)	**-0,50***	-			
Falhos (%)	**-0,86***	0,079	-		
C.V Lon. (%) [1]	**-0,51***	0,19	**0,45***	-	
Plantas (pl m^{-1})	**0,24***	0,11	**-0,30***	**-0,32***	-

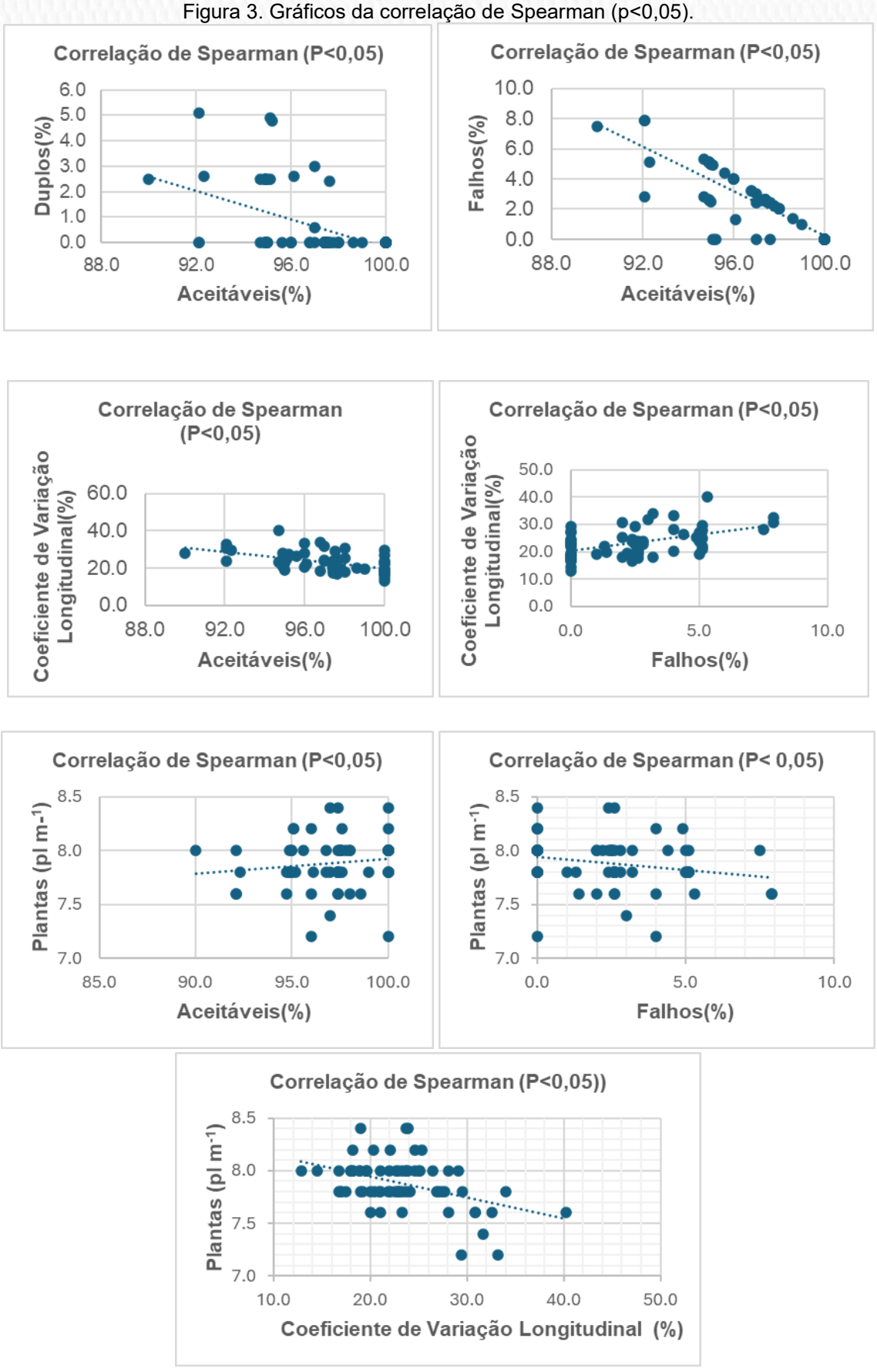
[1] Coeficiente de variação longitudinal *Significativo a 5% de probabilidade.
Fonte: Autores (2025).

Ao observar os gráficos das correlações das variáveis (Figura 3), verificou-se correlação negativa significativa entre os espaçamentos aceitáveis, duplos, falhos. Isso indica que a medida em que se tem um aumento de plantas duplas e falhos, os espaçamentos aceitáveis na distribuição diminuem e afeta a qualidade de semeadura. Para a variável do coeficiente de variação longitudinal, também se verificou correlação negativa significativa com os espaçamentos aceitáveis, indicando que conforme ocorre o aumento no coeficiente de variação na distribuição de plantas, tendem-se a diminuir os espaçamentos aceitáveis, pois com a alta variação na distribuição ocorrem erros na distribuição.

Também, foi observado correlação positiva significativa entre o coeficiente de variação longitudinal e os espaçamentos falhos. Isso indica que quanto maior a quantidade de espaçamentos falhos, maior será o coeficiente de variação, devido aos espaços vazios entre plantas. Isso ocorre muitas vezes por erro de singulação dos mecanismos dosadores de sementes, discos e anéis com medidas incorretas, falta de pressão de vácuo quando se trata de semeadoras pneumáticas para dosar as sementes, trepidação dos carros de linhas ou até mesmo a falta de qualidade da semente para ocorrer o processo de germinação.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 3. Gráficos da correlação de Spearman (p<0,05).



Fonte: Autores (2025).

A população de plantas por metro, obteve correlação positiva significativa com os espaçamentos aceitáveis e negativa com os falhos e o coeficiente de variação longitudinal,

indicando que quanto mais se tem espaçamentos aceitáveis mais se tem um estande de plantas bem definido, ou seja, a precisão na distribuição da população, já o aumento de falhos e do coeficiente de variação apresentam redução da população de plantas por metro influenciando diretamente a plantabilidade da semeadura.

Esses fatores impactam diretamente a produtividade das culturas no campo, pois, a medida em que se tem grande quantidade espaçamentos falhos e duplos, diminuem os espaçamentos aceitáveis e aumenta o coeficiente de variação da distribuição de plantas, possibilitando a ocorrência de plantas dominantes e dominadas em estágios diferentes, competição por água, luz e nutrientes.

Bisognin (2018), ao avaliar a relação da plantabilidade com a produtividade do feijoeiro comum de segunda safra, evidenciou que a produtividade de grãos foi afetada significativamente pelas simulações do coeficiente de variação longitudinal. A produtividade mínima foi de 1348 kg ha^{-1} e máxima de 1837 kg ha^{-1}, uma redução de 26,6% na produtividade, quando ouve variação de 0% há 60%. O autor concluiu que para cada 20% a mais de C.V., se perde 163 kg ha^{-1} de feijão e que a rentabilidade da semeadura do feijão em lavouras com mais de 40% de C.V., apresenta somente 50%, quando comparado com a distribuição sem erros na linha.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados da análise geostatística e da validação cruzada das variáveis estudadas. Na análise do IDE, todas as variáveis, exceto plantas/metro, de acordo com Zimback (2001) apresentaram dependência espacial forte, resultados estes diferentes dos observados por ARANTES (2020) que, ao avaliar o mapeamento do estande e distribuição longitudinal de plantas de milho, não encontraram dependência espacial para os espaçamentos aceitáveis, duplos e falhas.

Tabela 3. Parâmetros dos semivariogramas teóricos e Análise de validação cruzada referente à modelagem da dependência espacial das variáveis estudadas.

Variáveis	Parâmetros geoestatísticos						
	Modelo	a [1]	C_0+C [2]	C_0 [3]	IDE (%) [4]	SQR [5]	R^2 [6]
Aceitáveis [9]	Esférico	43,00	5,99	0,07	98,88	0,25	0,61
Duplos [10]	Esférico	49,10	1,43	0,16	88,88	0,02	0,63
Falhos [11]	Esférico	48,40	3,98	0,15	96,20	0,02	0,93
C.V Long. [12]	Exponencial	31,30	25,5	5,78	77,40	1,62	0,91
Plantas [13]	----------Efeito pepita puro----------						
	Parâmetros da análise da validação cruzada						
	Coeficiente de Regressão				**Y** [7]	**EPP** [8]	**R2**
Aceitáveis	0,80				19,08	2,41	0,04
Duplos	0,45				0,28	1,11	0,03
Falhos	0,93				0,09	1,85	0,10
C.V Longitudinal	1,00				0,90	4,70	0,13

[1] Alcance (m); [2] Patamar; [3] Efeito pepita; [4] Índice de dependência espacial; [5] Soma de quadrados do resíduo; [6] Coeficiente de determinação; [7] Intercepto; [8] Erro padrão de predição; [9] Espaçamentos aceitáveis (%); [10] Espaçamentos duplos (%); [11] Espaçamentos falhos (%); [12] Coeficiente de variação longitudinal (%); [13] plantas (pl m^{-1});

Fonte: Autores (2025)

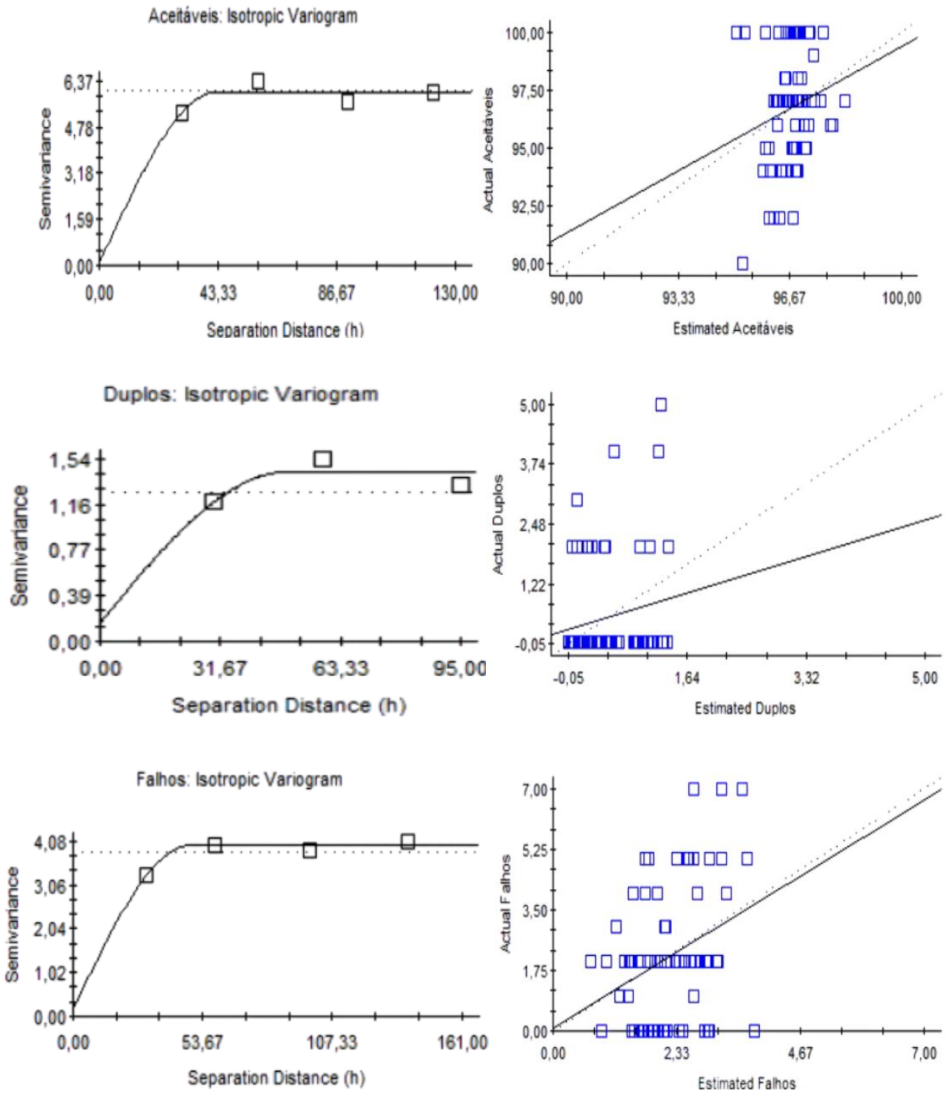
Já Bottega et al. (2017), ao avaliarem o mapeamento da distribuição longitudinal de plantas de soja em sistema de integração lavoura-pecuária, com os resultados da variabilidade espacial dos atributos espaçamentos falhos e espaçamentos aceitáveis/normais, observaram dependência espacial moderada, e a classe de espaçamentos duplos e plantas por metro não apresentaram dependência espacial na distância entre pontos amostrais utilizada, o que indica

ISBN 978-65-990392-6-3

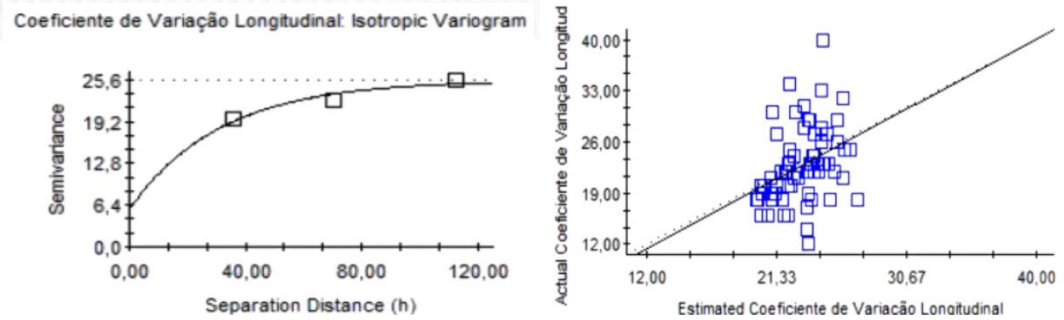
que suas distribuições foram aleatórias.

Na validação cruzada os coeficientes de regressão dos espaçamentos aceitáveis e falhos foram próximos ao ideal, para o coeficiente de variação longitudinal foi ideal e espaçamentos duplos foi moderado. Já para o coeficiente de determinação, os valores obtidos para todas as variáveis foram baixos. Nas regiões onde se tem maiores valores para espaçamentos aceitáveis são encontrados valores mais baixos para espaçamentos falhos, duplos e coeficiente de variação, já é de se esperar, pois para classes que representam uma proporção dentro de uma mesma variável (espaçamentos), o aumento de um implica na redução do outro. Na Figura 4 são apresentados, os gráficos de ajuste dos semivariogramas e da validação cruzada das variáveis analisadas.

Figura 4. Semivariogramas teóricos e validação cruzada resultantes da modelagem da dependência espacial das variáveis.



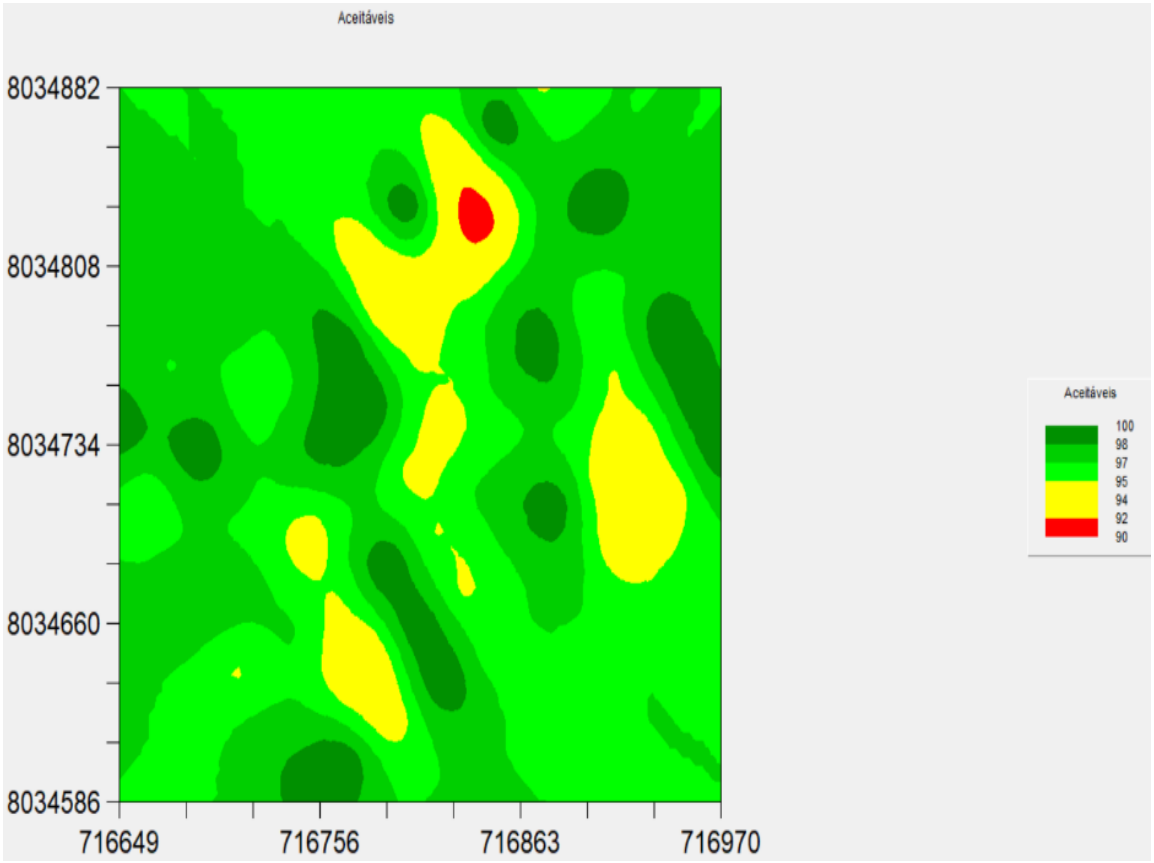
ISBN 978-65-990392-6-3



Fonte: Autores (2025)

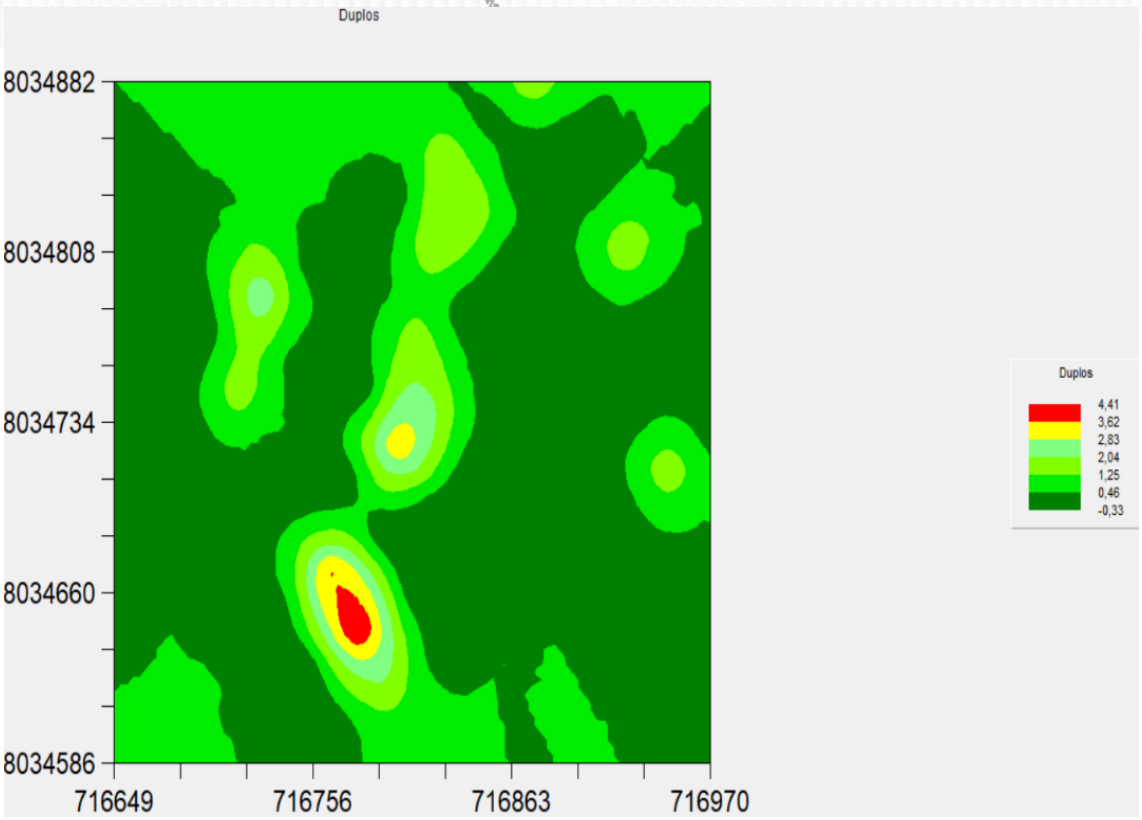
Na Figura 5 são apresentados os mapas temáticos gerados através do método de interpolação krigagem das variáveis estudadas. Uma análise visual dos mapas de distribuição espacial da porcentagem nos permite visualizar em regiões onde se houve diminuição da porcentagem de espaçamentos aceitáveis, aumento da quantidade de duplos, bem como também a porcentagem do coeficiente de variação longitudinal, indícios que houve uma perca de qualidade na plantabilidade.

Figura 5. Mapas temáticos da distribuição espacial das variáveis.

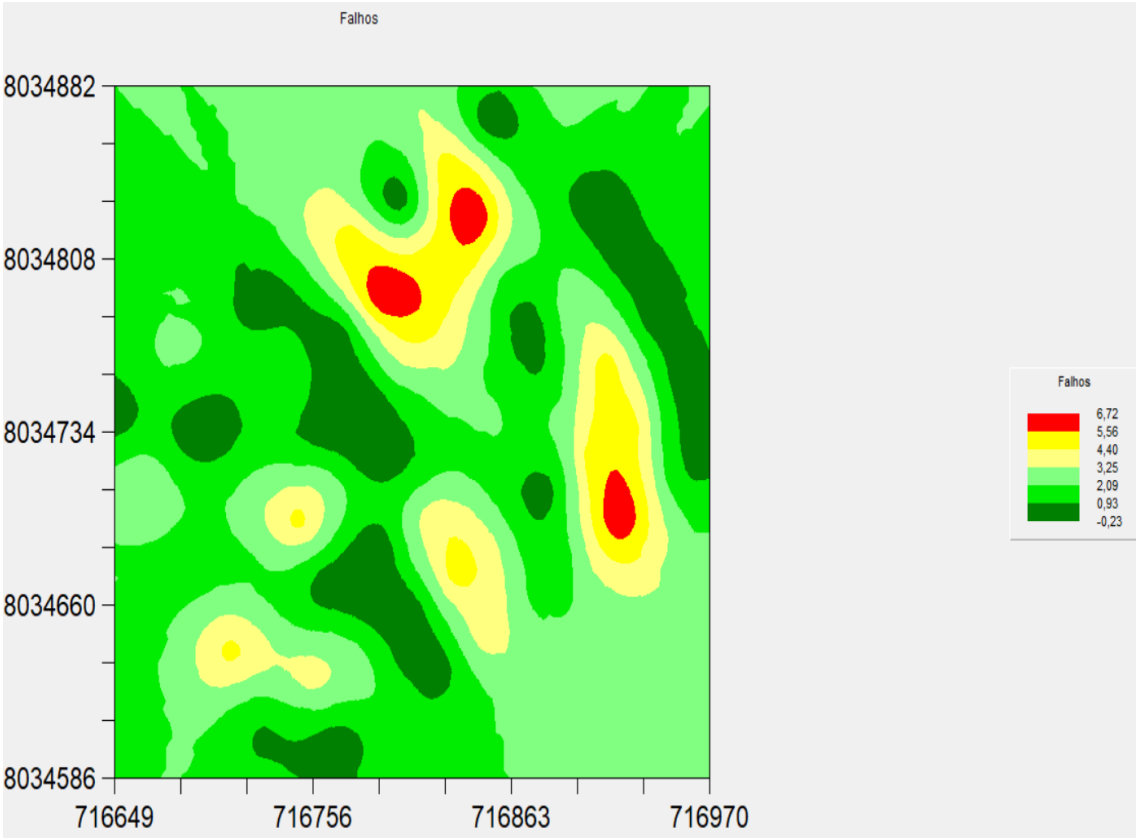


Legenda: Espaçamento aceitáveis

ISBN 978-65-990392-6-3

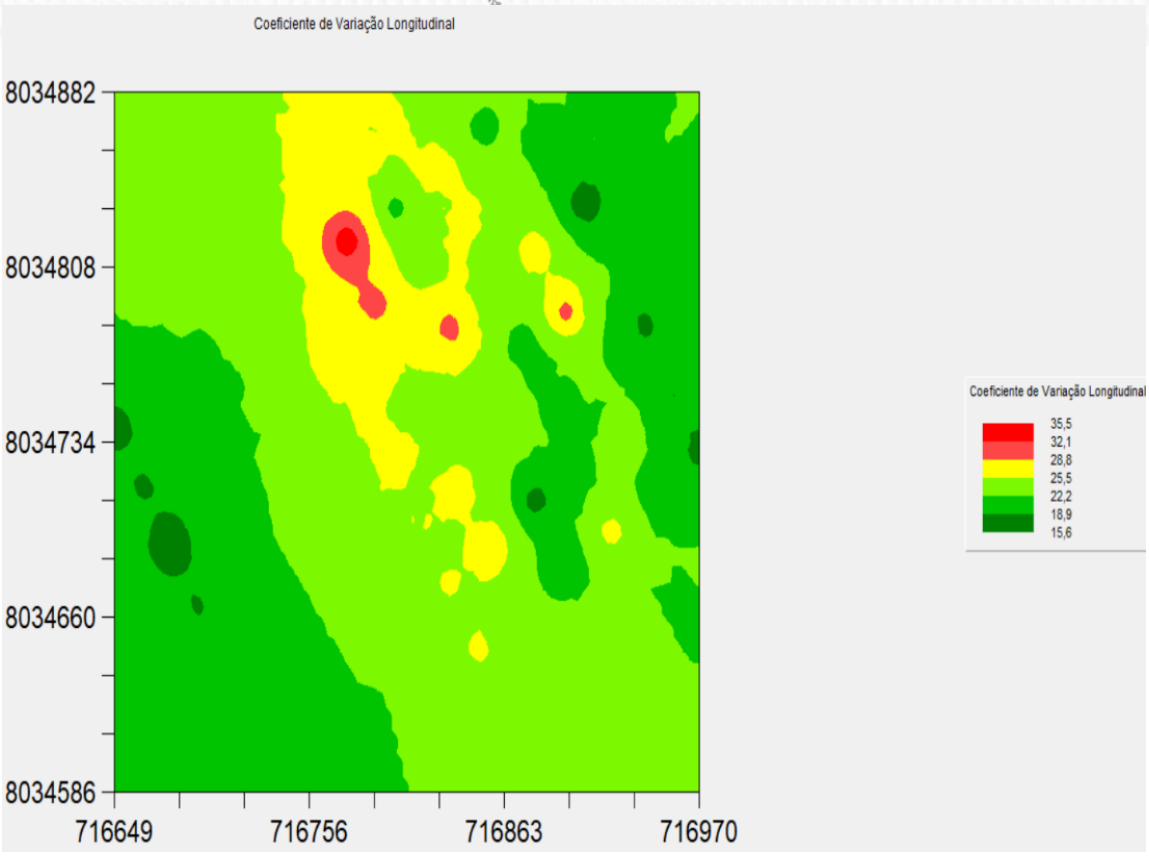


Legenda: Espaçamentos duplos



Legenda: Espaçamento Falhos

ISBN 978-65-990392-6-3



Legenda: Coeficiente de variação longitudinal
Fonte: Autores (2025)

No geral, através dos mapas temáticos, a tecnologia Selenium Neo apresentou resultados satisfatório, 90% da área com espaçamentos aceitáveis, acima de 95%, e coeficiente de variação da distribuição longitudinal abaixo de 22%, resultados estes diferentes observados por Arantes (2020), onde se obteve-se resultados de que 93% da área com 80% dos espaçamentos avaliados como normal/aceitáveis, não alcançando o mínimo de 90% dos espaçamentos normais estipulados para o dosador pneumático.

Com relação aos espaçamentos falhos e duplos na distribuição de plantas, também foram bem positivos, sendo uma média de 0,62% de duplos e 2,40% de falhos, os espaçamentos falhos avaliado com a cultura em estágio vegetativo v4, podem ocorrer sementes que não germinaram por fatores externos como pássaros, animais e até mesmo qualidade das sementes.

4 CONCLUSÃO

A variabilidade espacial dos atributos espaçamentos aceitáveis, duplos, falhos e coeficiente de variação longitudinal apresentou dependência espacial classificada como forte, com alcances de 43,00 – 49,10 – 48,40 e 31,30 metros, respectivamente. A classe de plantas por metro não apresentou dependência espacial na distância entre pontos amostrais utilizada, indicando que suas distribuições são aleatórias ou malha amostral utilizada não apresentou densidade suficiente para observar variabilidade.

A qualidade do desempenho do dosador com sistema de esteira condutora de sementes (Selenium Neo) na distribuição longitudinal do feijão foi classificada como ótima, em média 97,05% de espaçamentos aceitáveis, 2,40% de falhos e 0,62% de duplos.

ISBN 978-65-990392-6-3

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, dez. 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

ARANTES, G. C. **MAPEAMENTO DO ESTANDE E DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DE PLANTAS DE MILHO**. Disponível em: <https://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/bitstream/prefix/4421/1/GustavoCoelhoArantes.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2025.

BISOGNIN, Mateus Bortoluzi. **Plantabilidade e sua relação com a produtividade do feijoeiro comum (Phaseolus Vulgaris L.) de segunda safra.** Dissertação– Mestrado em Agricultura de Precisão. UFSM, Santa Maria, 2018.

BOTTEGA, E. L. et al. **MAPEAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DE PLANTAS DE SOJA EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA**. Disponível em: <https://conbea.org.br/anais/publicacoes/conbea-2017/anais-2017/maquinas-e-mecanizacao-agricola-mma/861-mapeamento-da-distribuicao-longitudinal-de-plantas-de-soja-em-sistema-de-integracao-lavoura-pecuaria/file>. Acesso em: 18 jul. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. V. 12, Safra 2024/2025, n. 9, nomo levantamento, 2025. Brasília: CONAB, 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/9o-levantamento-safra-2024-25/e-book_boletim-de-safras-9o-levantamento-2025>. Acesso em: 8 jul. 2025.

CORREIA, T. P. S. et al. Deposição e danos mecânicos em sementes de sorgo utilizando um mecanismo dosador de fluxo contínuo em ensaio de bancada. **Revista Energia na Agricultura**, v. 29, n. 1, p. 22-26, 2014.

CRESSIE, N. 1991. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, p. 900, 1991.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P. Correlação linear e espacial dos componentes de produção e produtividade da soja. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 2, p. 541-552, abr./jun. 2012.

GARCIA, R. F. et al. Influência da velocidade de deslocamento no desempenho de uma semeadora-adubadora de precisão no Norte Fluminense. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 3, p. 417-422, 2011.

JAKOB, A. A. E. **Estudo da correlação entre mapas de variabilidade de propriedades do solo e mapas de produtividade para fins de agricultura de precisão**. 1999. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

MALAQUIAS JÚNIOR, J. D.; SILVA, M. P. B. **Importância do potássio na cultura do feijão**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Universidade Católica de Goiás, 2020.

MODOLO, A. J. et al. Efeito da compactação do solo sobre a semente no desenvolvimento da cultura do feijão. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 89-95, jan./mar. 2011. DOI: 10.4025/actasciagron. v33i1.4236.

MIALHE, L.G. **Máquinas agrícolas:** ensaios e certificação. Piracicaba: FEALQ, 1996, 722 p.

MOLIN, J.P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, v.22, p.83-92, 2002.

ISBN 978-65-990392-6-3

NETO, R. P. et al. Desempenho de mecanismos dosadores de sementes em diferentes velocidades e condições de cobertura do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 5, p. 611-617, 2008.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, Planta e Atmosfera**: conceitos, processos e aplicações. 2 ed. Barueri, SP: Manole, p. 500, 2012. Socioeconomia - Portal Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/pre-producao/socioeconomia>. Acesso em: 8 jul. 2025.

TOURINO, M. C.; KLINGENSTEINER, P. Ensaio e avaliação de semeadoras-adubadoras. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 8., 1983, Rio de Janeiro. **Anais**.... Rio de Janeiro: UFRRJ, v.2. p.103 -116, 1983.

Vieira, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, 352p. p.1-54, 2000.

KURACHI, S.A.H. et al. Avaliação tecnológica de semeadoras e/ou adubadoras: tratamento de dados de ensaios e regularidade de distribuição longitudinal de sementes. **Bragantia**, Campinas, v.48, n.2, p.255, 1989

KRZYZANOWSKI, F.C.; FRANÇA NETO, J.B.; COSTA, N.P. Efeito da classificação de sementes de soja por tamanho sobre sua qualidade e a precisão de semeadura. **Revista Brasileira de Sementes**, v.13, p.59-68, 1991.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. Cap.2, p.319-344, 1990.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo** 2001. 114f. Tese (Livre-Docência em Levantamento do solo e Fotopedologia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.



ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 47

CORRELAÇÃO GEOESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO E DA PRODUTIVIDADE DA SOJA

Geospatial correlation of soil penetration resistance and soybean yield

Gustavo Bock Bernhard[1]; Eduardo Leonel Bottega[1,2]*; Zanandra Boff de Oliveira[1,2]; Endiele Lopes dos Santos[1a]; Guilherme Weber Bourscheid[2]; Lúcio de Paula Amaral[2]; Carlos Eduardo da Silva[1]; Pedro Eduardo Fischer Boeno[1]

[1] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), campus de Cachoeira do Sul, Rod. Taufik Germano 3013 – Universitário II, 96503-205, Cachoeira do Sul – RS, Brasil, gustavo.bernhard@acad.ufsm.br, endielelopes@gmail.com, dasilvakadu03@gmail.com, pedro.boeno@acad.ufsm.br
[2] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Colégio Politécnico, PPGAP, Av. Roraima 1000 – Camobi, 97105-000, Santa Maria – RS, Brasil, eduardo.bottega@ufsm.br, zanandra.oliveira@ufsm.br, guilherme.wbourscheid@gmail.com, lucio.amaral@ufsm.br
[a] Parte do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCC) em Engenharia Agrícola, UFSM-CS.
*Autor correspondente: eduardo.bottega@ufsm.br

RESUMO

A compactação do solo representa um dos principais fatores que limitam o crescimento das raízes das culturas agrícolas, especialmente em sistemas de produção com elevado tráfego de máquinas. Esta limitação física interfere na absorção de água e nutrientes, impactando negativamente o desenvolvimento das plantas e, consequentemente, sua produtividade. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo mapear a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração (RP) e a produtividade da soja sob sistema de plantio direto, prática amplamente adotada no sul do Brasil. O experimento foi conduzido em uma área de 8,6 ha, onde se aplicou uma grade amostral de 75 pontos para medições de RP e umidade do solo, além de 40 pontos para avaliação da produtividade. Foi observada variabilidade espacial significativa da RP nas camadas de 0–10 cm e 10–20 cm, indicando a presença de zonas compactadas. A produtividade variou de forma expressiva entre os pontos, com valores entre 2.512,15 e 7.274,89 kg ha^{-1}, reforçando a influência da variabilidade do solo. Apesar das diferenças observadas, não foi verificada correlação significativa entre RP e produtividade, sugerindo que a boa disponibilidade hídrica durante o ciclo da cultura pode ter minimizado os efeitos da compactação. Como contribuição prática, este estudo demonstra a importância de integrar o monitoramento da compactação do solo com a análise de produtividade para subsidiar estratégias de manejo localizado em áreas de plantio direto.

Palavras-chave: *Glycine max.* compactação do solo. agricultura de precisão.

ABSTRACT

Soil compaction is one of the main factors limiting root growth of agricultural crops, especially in production systems with high machinery traffic. This physical limitation interferes with water and nutrient uptake, negatively affecting plant development and, consequently, yield. In this context, the present study aimed to map the spatial variability of soil resistance to penetration (RP) and soybean yield under a no-tillage system, a practice widely adopted in southern Brazil. The experiment was conducted in an 8.6 ha field, where a sampling grid of 75 points was applied to measure RP and soil moisture, and 40 points were used to evaluate yield. Significant spatial variability of RP was observed in the 0–10 cm and 10–20 cm layers, indicating the presence of

ISBN 978-65-990392-6-3

compacted zones. Yield varied considerably across the field, ranging from 2,512.15 to 7,274.89 kg ha^{-1}, reinforcing the influence of soil variability. Despite these differences, no significant correlation was found between RP and yield, suggesting that the good water availability during the crop cycle may have minimized the effects of compaction. As a practical contribution, this study highlights the importance of integrating soil compaction monitoring with yield analysis to support site-specific management strategies in no-tillage systems.

Keywords: *Glycine max.* soil compaction. precision agriculture

1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja é uma das mais importantes para o agronegócio brasileiro, ocupando a maior área cultivada e se consolidando como a principal commodity agrícola do país. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024), a área plantada de soja no Brasil na safra 2024/25 atingiu 47,61 milhões de hectares, com produção estimada em 171,48 milhões de toneladas e produtividade média de 3.560 kg ha^{-1}. Esses números reforçam a relevância da soja na matriz produtiva nacional, bem como sua importância econômica para o comércio exterior.

Dentre as tecnologias empregadas no cultivo da soja, visando a sustentabilidade do sistema produtivo, o sistema de plantio direto (SPD) é prática consolidada na agricultura nacional. O SPD é amplamente utilizado no Brasil como prática conservacionista, pois minimiza a erosão e favorece a ciclagem de nutrientes. Entretanto, devido ao tráfego intenso de máquinas e à ausência de revolvimento do solo, pode ocorrer formação de camadas compactadas, especialmente em profundidades de 10 a 20 cm. Essa compactação pode limitar a exploração radicular, restringindo a absorção de água e nutrientes, o que impactar negativamente a produtividade potencial da soja (REICHERT et al., 2007; BETIOLI JÚNIOR et al., 2012).

A compactação do solo provoca redução da porosidade e aumento da resistência à penetração, dificultando o crescimento radicular, a absorção de água e nutrientes e, consequentemente, o rendimento das culturas (DALCHIAVON et al., 2011; SILVA et al., 2020). Assim, compreender a influência das propriedades físicas do solo sobre a produtividade da soja, bem como sua relação geoespacial, é fundamental para o manejo assertivo em sistemas agrícolas voltados à produção desta importante cultura.

Nesse contexto, a agricultura de precisão surge como uma ferramenta fundamental para diagnosticar a variabilidade espacial dos atributos do solo e da cultura. O uso de ferramentas e técnicas como geoestatística, sensores e softwares de mapeamento, permitem identificar zonas de compactação e estabelecer estratégias de manejo localizado, visando maior eficiência e sustentabilidade da produção (SARI, 2020; PEREIRA et al., 2022).

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo mapear a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e da produtividade da soja cultivada em sistema de plantio direto. Além disso, buscou-se quantificar a correlação entre esses dois fatores, a fim de compreender melhor como a resistência do solo afeta o desempenho produtivo da soja.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido na área agrícola da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) campus em Cachoeira do Sul (UFSM-CS). O talhão utilizado no estudo possui

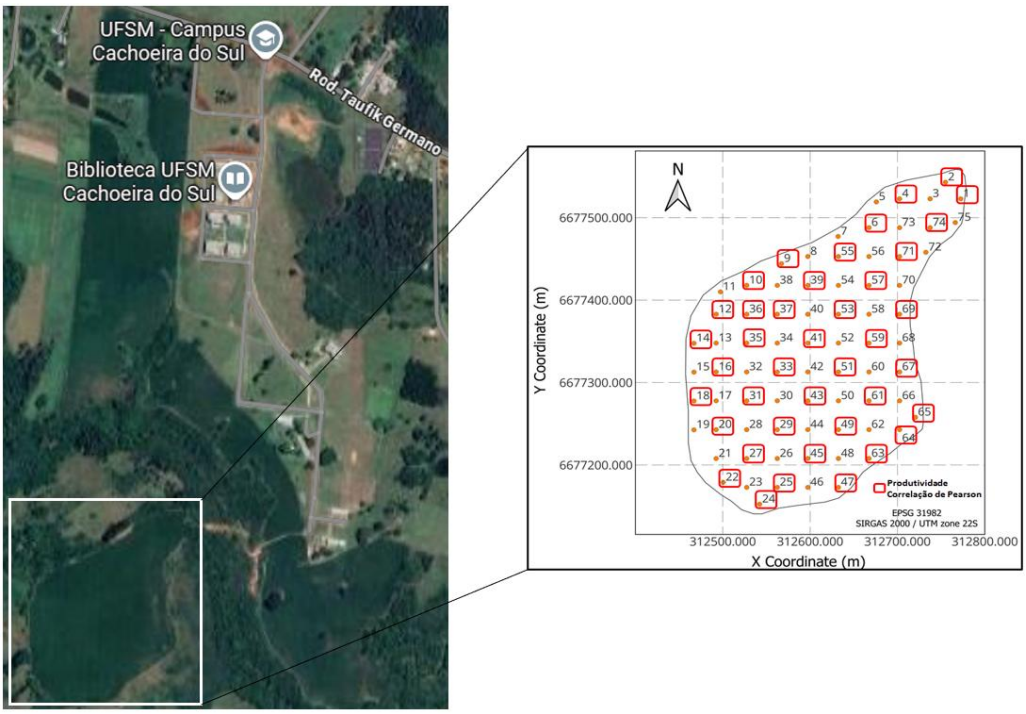
PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque/RS · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

área de 8,6 hectares, com coordenadas centrais 30°01’23” de latitude Sul e 52°56’59” de longitude Oeste. O solo é classificado como Argissolo vermelho (EMBRAPA, 2013). A área vem sendo manejada sob sistema de plantio direto desde a safra 2021/22. Antes do início do sistema de plantio direto, o solo foi trabalhado de forma convencional, sendo realizada uma operação de aração seguida de duas operações de gradagem. Foi aplicado 5 Mg ha^{-1} de calcário para correção da acidez do solo antes do revolvimento.

No talhão estudado foi estabelecida uma grade composta por 75 pontos georreferenciados, espaçados regularmente em 35 metros, nos quais foi medida a resistência do solo à penetração (RP) e a umidade do solo. Destes pontos, 40 pontos serviram como base para a coleta de amostras de plantas para o mapeamento da produtividade da soja e para análise de correlação de Pearson ($p<0,05$). Na Figura 1 é apresentado o polígono delimitador da área e a grade de pontos amostrais georreferenciados.

Figura 1– Polígono delimitador da área de estudo e grade de pontos amostrais utilizadas no mapeamento da produtividade da soja e da resistência do solo à penetração. Cachoeira do Sul, 2024.



Fonte: Adaptado de Santos (2024).

Na área estudada foi semeada a cultura da soja, sob resteva de aveia, sendo essa, a segunda safra de verão em sistema plantio direto na área agrícola. A semeadura ocorreu no dia 28 de novembro de 2023, sendo realizada utilizando um conjunto mecanizado formado por um trator marca Massey Ferguson, modelo 4275, de 90 cv de potência (motor original de 75 cv, porém o trator foi turbinado) e uma semeadora-adubadora de precisão, marca Massey Ferguson, modelo 407, com 07 linhas espaçadas em 0,45 metros. Foi utilizado sulcador tipo haste para a abertura do sulco de fertilizante e sulcador tipo disco duplo defasado para abertura do sulco de sementes.

A cultivar semeada foi HO PIRAPÓ IPRO, com taxa de semeadura de 14 sementes por metro e espaçamento entre linhas de 0,45 metros. Pertencente à empresa HO Genética, esta cultivar apresenta tecnologia INTACTA RR2 PRO e grupo de maturação relativa (GMR) de 6.4. De acordo com o detentor da cultivar, seus pontos fortes são o alto teto produtivo, excelente

ISBN 978-65-990392-6-3

engalhamento e elevado peso de grãos. Apresenta resistência às doenças pústula bacteriana, cancro da haste e podridão radicular (*Phytophtora*).

O mapeamento da produtividade da soja foi realizado coletando, em cada um dos 40 pontos amostrais, as plantas presentes em 03 (três) linhas de 01 (um) metro de comprimento, representativas de uma área de 1,35 m^2. A colheita foi realizada de forma manual, no dia 24 de abril de 2024, sendo as plantas arrancadas inteiras, agrupadas em maços e amarradas com barbante. Os maços foram devidamente identificados com a numeração do ponto amostral colhido. Posteriormente procedeu-se a debulha das amostras, limpeza, pesagem e determinação da umidade da massa de grãos de cada amostra.

Para pesagem dos grãos utilizou-se uma balança digital de precisão. Para estimativa da umidade, um medidor de umidade de grãos de bancada que usa o método da capacitância. A produtividade da soja foi estimada corrigindo a umidade dos grãos para 13% (umidade desejada) e extrapolando o valor da massa obtida (kg) na área de coleta (1,35 m^2) para 10.000 m^2 (1 ha). No cálculo da produtividade foi utilizada a Equação 1.

$$PRD = \frac{\left(Pu \cdot \frac{100 - U_r}{100 - U_d}\right)}{1.000} \cdot 10.000 \over 1,35 \qquad (1)$$

Onde: PRD = Produtividade de soja, kg ha^{-1}; Pu = Peso úmido, g; U_r = Umidade medida, %; U_d = Umidade desejada, %; 1.000 = Conversão de gramas para kg; 10.000 = Conversão de m^2 para ha; 1,35 = Área colhida; m^2

A resistência do solo a penetração (RP, MPa) foi mensurada utilizando um penetrômetro digital da marca Falker, modelo PLG1020. Este equipamento realiza leituras de RP até a profundidade de 60 centímetros, sendo neste estudo considerados os valores de RP até a profundidade de 30 centímetros, divididos nas seguintes camadas: RP0-10cm; RP10-20cm e RP20-30cm. Foi utilizada para as medições, uma ponta cone tipo 2 com área de 130 mm^2 e 12,83 mm de diâmetro (ASABE, 2010), recomendada para o tipo de solo da área de estudo. Os dados coletados foram armazenados no equipamento e posteriormente transferidos para o computador em arquivo no formato (.xlsx).

Durante as leituras de RP foram efetuadas medidas da umidade do solo utilizando o sensor experimental *Smart Soil Sensor* em cada um dos 75 pontos amostrais. O sensor utilizado foi desenvolvido por pesquisadores do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Esse sensor é caracterizado como sendo uma plataforma multissensor, pois além de medir a condutividade elétrica aparente do solo, mede também a umidade e a temperatura do solo.

Na Figura 2 são apresentados o penetrômetro PenetroLOG (Fig. 2a) e o Sensor experimental *Smart Soil Sensor* (Fig. 2b), utilizados nas coletas de dados.

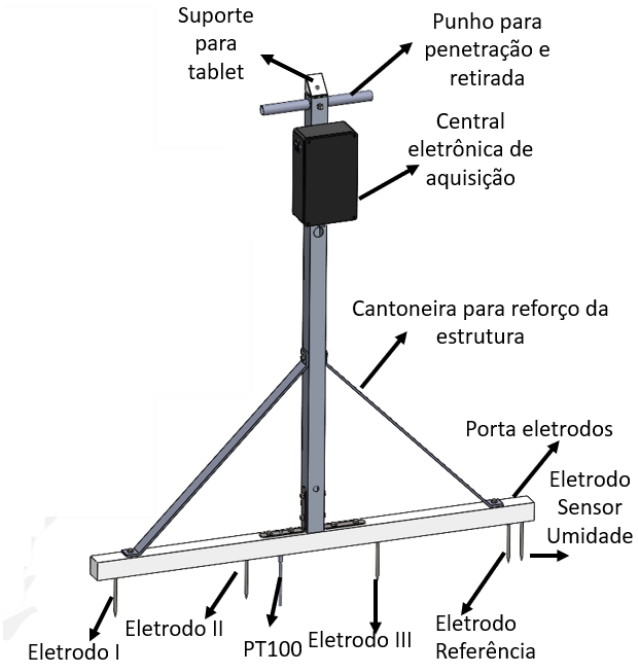
Os dados de RP e produtividade de soja compuseram o banco de dados utilizados nas análises estatísticas e geoestatísticas subsequentes. Primeiramente procedeu-se a análise estatística descritiva, sendo identificados os valores mínimo e máximo e calculadas a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2 – Penetrômetro (A) e Sensor experimental *Smart Soil Sensor* (B), utilizados nas coletas de dados.



(A)
Fonte: Santos (2024)



(B)
Fonte: Adaptado de Bottega et al. (2024)

Posteriormente, foi realizada a modelagem da dependência espacial, a fim de caracterizar a variabilidade espacial das variáveis mensuradas na área de estudo. A dependência espacial foi avaliada pelo ajuste de variogramas, pressupondo a estacionaridade da hipótese intrínseca, definida pela Equação 2.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(xi) - Z(xi+h)]^2 \quad (2)$$

Onde: $\hat{\gamma}(h)$ = Semivariância em função da distância de separação (h) entre pares de pontos; h = Distância de separação entre pares de pontos, m; N(h) = Número de pares experimentais de observações Z(xi) e Z (xi + h) separados por uma distância h.

Foram testados os seguintes modelos: gaussiano, linear com patamar, esférico e exponencial. Foi selecionado o modelo que apresentar menor soma de quadrados dos resíduos (RMSE) e maior coeficiente de determinação (R^2). Após ajustado e validado o modelo, foi realizada a interpolação dos valores para predição em locais não amostrados. O método de validação adotado foi o da validação cruzada e a interpolação de valores realizada por krigagem ordinária que, de acordo com Oliver; Webster (2014) fornece as melhores previsões lineares sem viés.

A análise da variabilidade espacial foi realizada no Sistema de Informações Geográficas Quantum GIS (QGIS), versão 3.28 Firenze, utilizando o plugin Smart-Map, desenvolvido por Pereira et al. (2022). O Smart-Map possibilita a predição de valores em locais não amostrados e o mapeamento de atributos do solo, a partir da interpolação dos dados utilizando Krigagem ordinária.

Para a análise estatística descritiva e o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson, foi utilizado o programa computacional Statistica, versão 7. Foram ainda confeccionados, neste

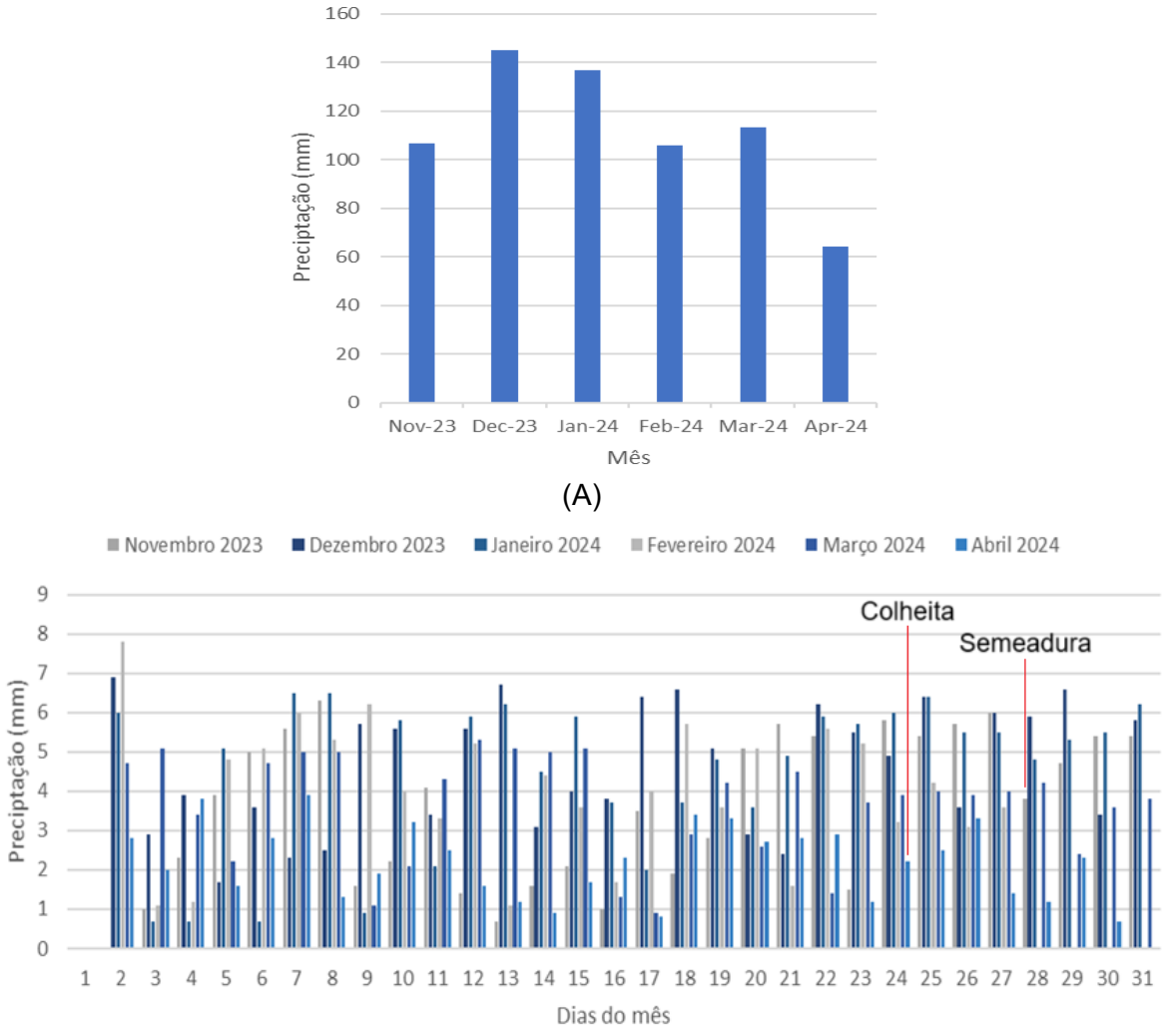
ISBN 978-65-990392-6-3

mesmo software, os gráficos de correlação de Pearson ($p<0,05$) entre a produtividade de soja e a resistência do solo à penetração nas diferentes camadas estudadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 são apresentados os gráficos indicativos das precipitações pluviométricas que ocorreram na área durante o ciclo de desenvolvimento da soja. Na Fig. 3A é apresentada a distribuição mensal de chuvas e na Fig. 3B a distribuição diária.

Figura 3 – Precipitação pluviométrica mensal (A) e diária (B) registrada para a área do experimento no período de novembro de 2023 à abril de 2024. Cachoeira do Sul, 2024.



Fonte: Estação meteorológica da UFSM – Grupo Metos Brasil.

A distribuição mensal de chuvas, observada no período de novembro de 2023 a abril de 2024, foi de um somatório pluviométrico de 672mm. Durante o ciclo da soja, as fases de floração e enchimento de grãos trata-se dos períodos em que a cultura requer aproximadamente oito milímetros de chuva por dia (ÁVILA et al., 2013). Neste estudo, esses períodos foram compreendidos entre os meses de fevereiro e março de 2024, ambos com excelente disponibilidade de chuvas, como pode ser observado na Fig. 3A, com acumulados acima dos 100 mm.

Oliveira et al. (2021) estudando a influência da irrigação suplementar na produtividade de cultivares de soja, para a safra e safrinha 2018-19 e 2019-20 na região central do Rio Grande do Sul, destacaram a importância da quantidade e da distribuição das chuvas, em especial no período compreendido entre janeiro e março, pois, na região central do RS, a falta de chuvas neste período é considerado fator primordial e limitante à produtividade da cultura de soja, dado o estádio de desenvolvimento a qual a cultura se encontra ao nível de campo. A influência do déficit hídrico durante a floração e enchimentos de grãos demonstra ser um fator crucial no desempenho produtivo da cultura da soja, pois afeta de forma direta o número de vagens por planta (ZANON et al. 2016; TAIZ; ZEIGER, 2013), um dos principais componentes de rendimento da cultura da soja.

Conforme apresentado nas Fig. 3A e Fig. 3B, o déficit hídrico não foi um parâmetro comprometedor no período do presente estudo, o qual houve disponibilidade hídrica ao longo de todo o período. A disponibilidade de água é um fator crucial para a produtividade da cultura de soja, especialmente em momentos críticos do ciclo, como enchimento de grãos. Estudos demonstram que a presença de déficits hídricos nesses períodos pode reduzir o rendimento da soja, impactando negativamente no desenvolvimento das plantas (ROSA et al., 2018).

Na Tabela 1 é apresentada a estatística descritiva dos atributos mensurados: umidade do solo (UMD, %), resistência do solo à penetração nas camadas de 0-10 (RP 0-10, MPa), 10-20 (RP 10-20, MPa), 20-30 (RP 20-30, MPa) e a produtividade da soja (PRD, Kg ha^{-1}). O maior valor de RP do solo foi observado para a camada 20-30, equivalente à 2,64 MPa. A produtividade média de soja no talhão foi de 4.919,29 kg ha^{-1}, equivalente à 81,99 sacas.

Tabela 1 – Estatística descritiva dos valores de umidade do solo (UMD, %), resistência do solo à penetração nas camadas de 0-10 (RP 0-10, MPa), 10-20 (RP 10-20, MPa), 20-30 (RP 20-30, MPa) e produtividade de soja (PRD, kg ha^{-1}). Cachoeira do Sul, 2024

Atributos	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão	CV%
UMD (%)	7,8	17,72	30,20	3,85	21,72
RP 0-10 (MPa)	0,19	0,61	1,40	0,26	43,55
RP 10-20 (MPa)	0,89	2,06	3,46	0,58	28,18
RP 20-30 (MPa)	0,57	2,64	4,27	0,66	24,87
PRD (Kg ha^{-1})	2.512,15	4.919,29	7.274,89	944,67	19,20

Fonte: Santos (2024)

Diversos autores relatam que a compactação do solo exerce influência variável sobre a produtividade respectiva cultura (DALCHIAVON et al., 2011). Dentre as características físicas, a RP do solo é destacada. No presente estudo foi observada resistência à penetração (RP) média superior a 2,0 MPa, nas camadas de 10-20 e 20-30 cm. Valor de RP acima de 2,0 MPa pode ser considerado restritivos para o desenvolvimento do sistema radicular, por indicar compactação do solo, de acordo com estudo conduzido por Richart et al. (2005). Porém, apesar das tendências apresentadas, os valores de resistência à penetração obtidos neste estudo ainda estão abaixo da faixa entre 3,0 e 4,0 MPa, considerada crítica por Betioli Junior et al. (2012).

Diversos trabalhos têm evidenciado a relação da RP do solo com o desenvolvimento e produtividade das culturas. Estudo conduzido por Rosa et al. (2018) destacaram a resistência a penetração como um parâmetro que descreve a barreira física em que o solo oferece ao crescimento e desenvolvimento de raízes. Em seus estudos, Reichert et al. (2007) constataram que a compactação do solo reduz a aeração, infiltração de água e a condutividade hidráulica, aumentando o escoamento superficial e comprometendo o desenvolvimento de plantas devido à restrição hídrica e o crescimento radicular limitado.

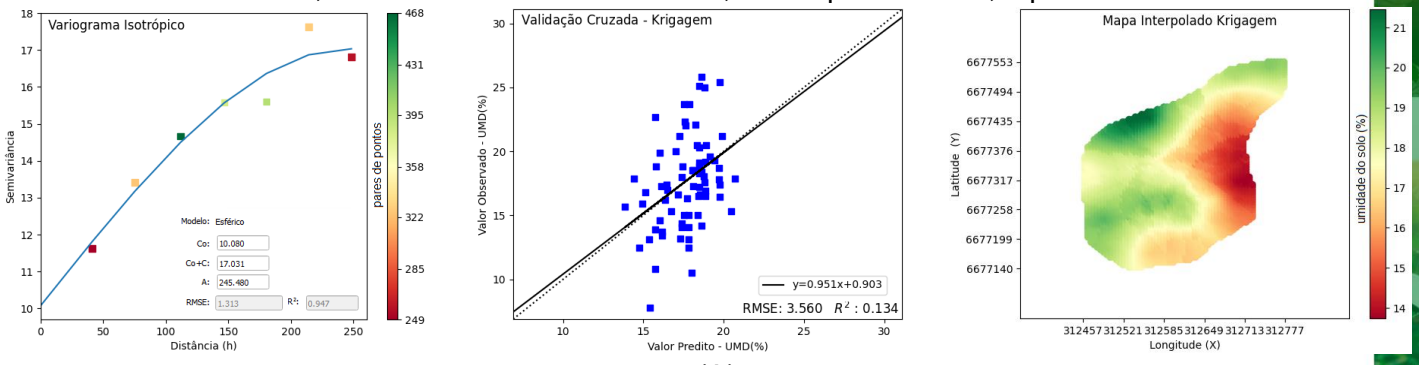
PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque/RS · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

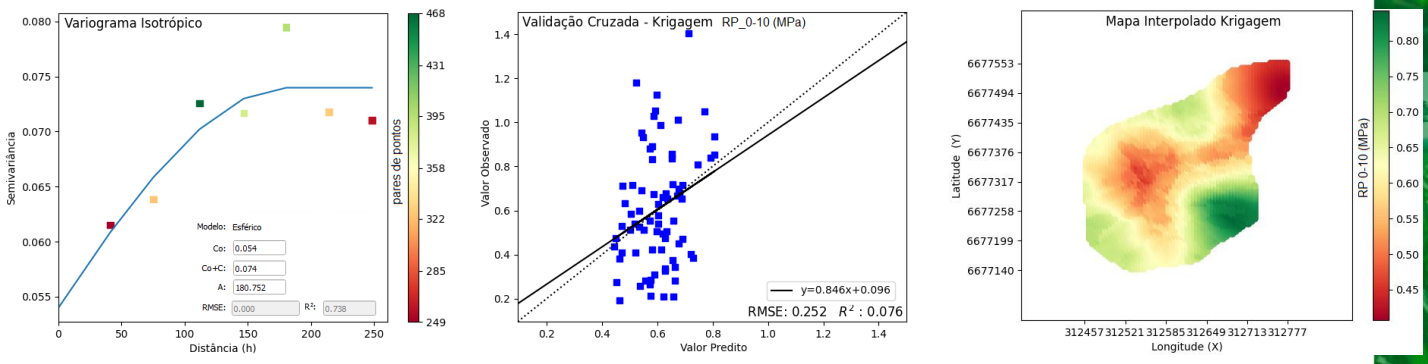
Na Figura 4 são apresentados os semivariogramas, gráficos de validação cruzada e mapas temáticos da distribuição espacial da umidade do solo (Fig. 4A, %), da resistência do solo à penetração (RP, MPa) nas camadas 0-10 (Fig. 4B), 10-20 (Fig. 4C), 20-30 (Fig. 4D) e da produtividade da soja (Fig. 4E, kg ha^{-1}). A resistência do solo à penetração na camada 20-30 não apresentou variabilidade espacial, sendo ajustado o modelo efeito pepita puro, indicativo de variabilidade espacial totalmente aleatória.

Figura 1 – Semivariogramas, gráficos de validação cruzada e mapas temáticos da distribuição espacial da umidade do solo (A, %), da resistência do solo à penetração (MPa) nas camadas 0-10 (B), 10-20 (C), 20-30 (D) e da produtividade da soja (E, kg ha^{-1}). Cachoeira do Sul, 2024.da soja, dependendo da disponibilidade hídrica e da profundidade das camadas compactadas. Dalchiavon et al. (2011) observaram que a compactação impacta negativamente a produtividade apenas quando coincide com as principais zonas de absorção radicular. De forma semelhante, Ávila et al. (2013) destacaram que em condições de boa disponibilidade hídrica, a compactação não se traduz necessariamente em redução de rendimento, resultado compatível com o presente estudo. Por outro lado, Morando et al. (2014) evidenciaram que o déficit hídrico potencializa os efeitos da compactação, reforçando que a interação entre fatores físicos e climáticos é determinante para a produtividade. Assim, a ausência de correlação significativa encontrada aqui pode ser explicada pela boa distribuição de chuvas, que atenuou os efeitos da compactação, corroborando os achados de Rosa et al. (2018) e Reichert et al. (2007).

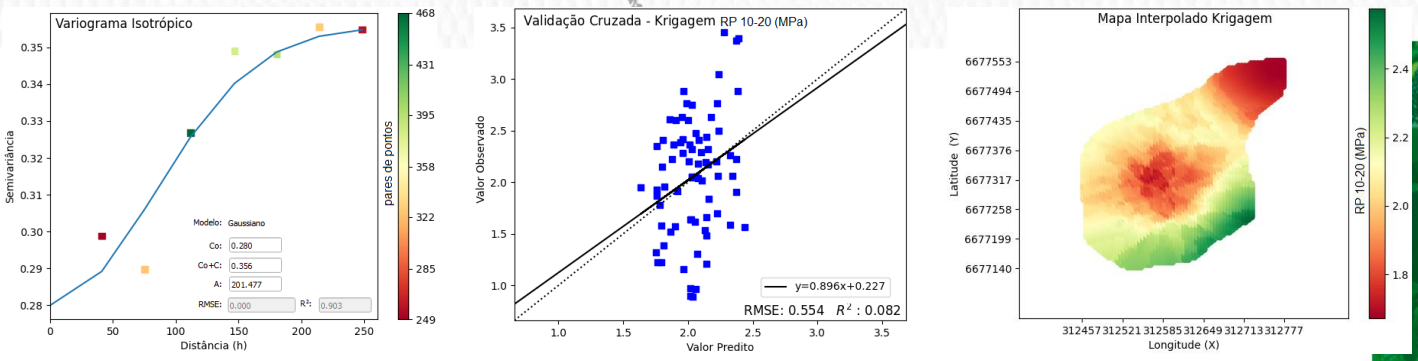
As características físicas do solo são alguns fatores que podem restringir o crescimento do sistema radicular, afetando o desenvolvimento e, consequentemente, a produtividade da



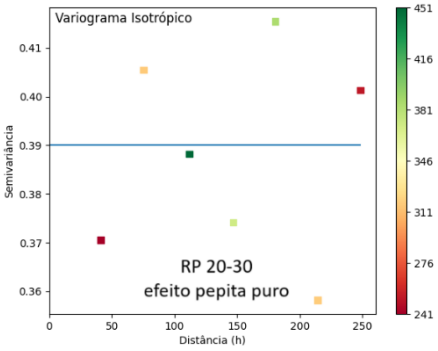
(A)



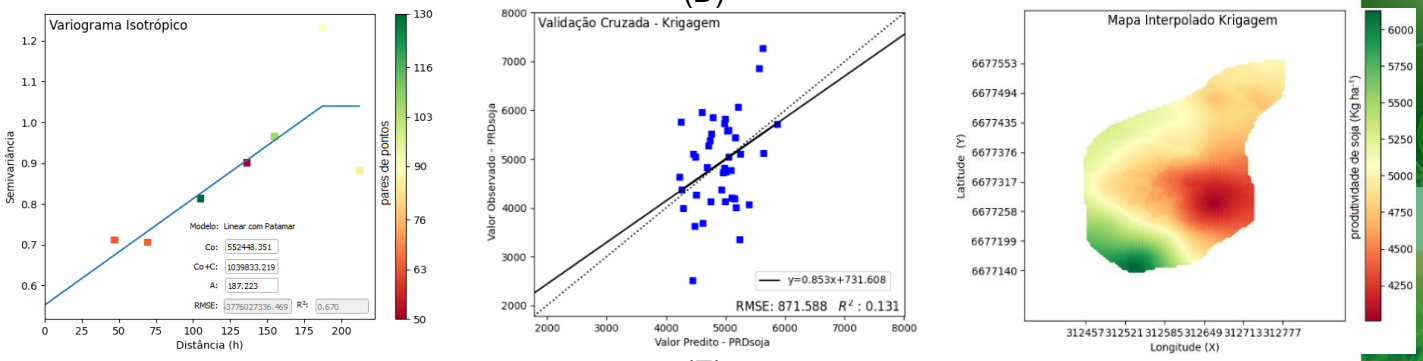
(B)



(C)



(D)



(E)

Fonte: Santos (2024)

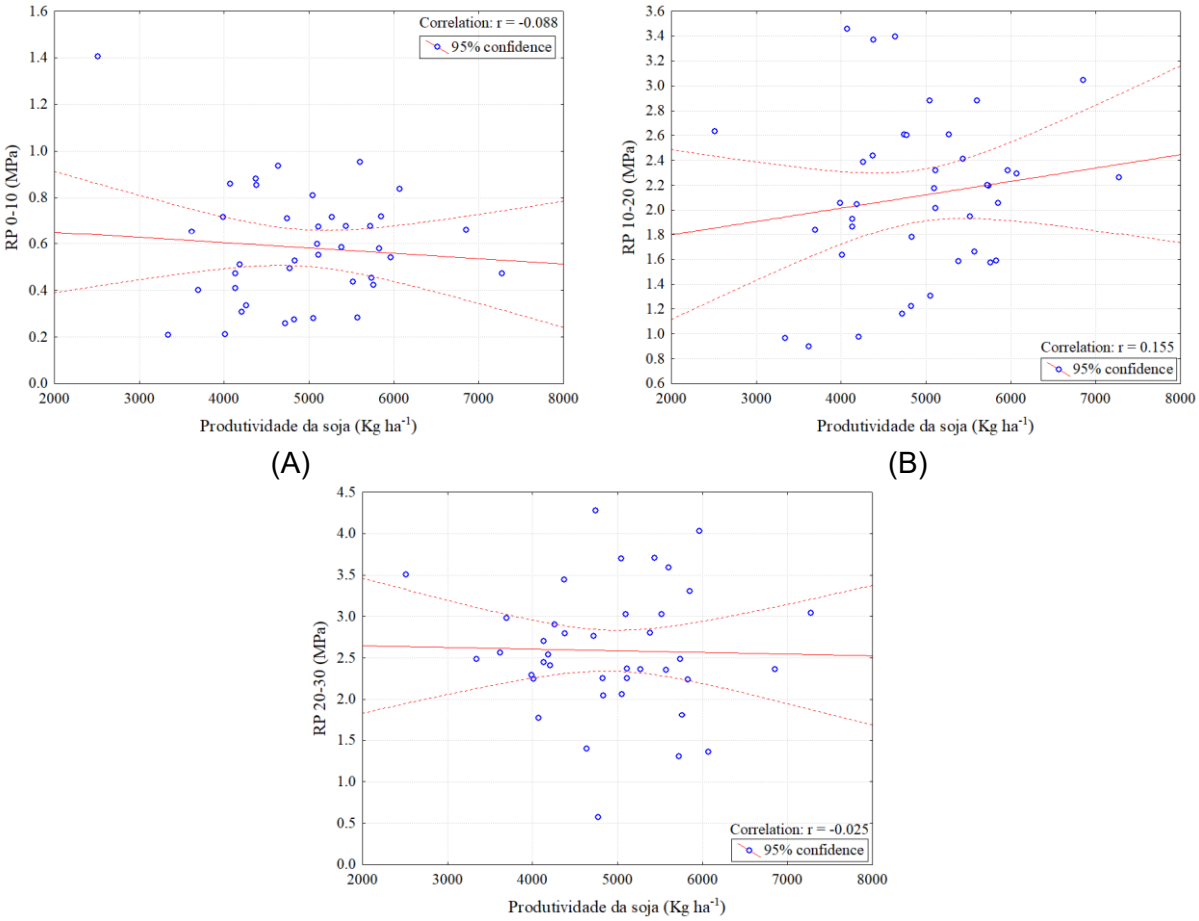
O modelo esférico foi ajustado na modelagem da umidade do solo e da RP na camada de 0-10. O modelo gaussiano foi ajustado para a RP na camada de 10-20. Estudando a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em áreas cultivadas com cana-de-açúcar sob diferentes tempos de colheita mecanizada com tráfego controlado, Silva et al. (2024) obtiveram ajuste dos modelos gaussiano e esférico para descrever o comportamento espacial da RP do solo nas camadas 0-10 e 10-20, respectivamente. O inverso foi observado neste estudo. O menor valor de alcance obtido nos ajustes dos semivariogramas neste estudo foi de 180,75 metros, superior a distância entre pontos da grade amostral, que foi de 35 metros. Cornélio et al. (2021) destacam que o conhecimento do alcance de dependência espacial possibilita determinar o raio de amostragem, o que, neste estudo, mostrou-se suficiente para captar a variabilidade espacial.

O modelo esférico foi ajustado para RP na camada de 0-10 cm e para a umidade do solo, mostrando que estes atributos possuem uma variabilidade espacial bem definida em menores distâncias de observação. O modelo Gaussiano, ajustado para RP na camada de 10-20cm, sugere que uma variabilidade mais gradual e continua nesta camada quando em comparação às outras. A escolha dos modelos reflete diretamente na forma como os dados são interpolados, impactando a interpretação e a visualização da variabilidade espacial.

ISBN 978-65-990392-6-3

Na Figura 5 são apresentados os gráficos da correlação de Pearson entre a RP nas diferentes camadas estudadas e a produtividade da soja. Não foi observada correlação significativa entre RP e produtividade da soja, independente da camada analisada. Este resultado sugere que, sob as condições do presente estudo, a RP do solo não foi um fator limitante direto para o rendimento da soja. A boa disponibilidade hídrica ao longo do ciclo da cultura amenizou as limitações físicas impostas pela compactação do solo.

Figura 2 – Gráficos da correlação de Pearson entre a produtividade da soja com a resistência do solo à penetração nas diferentes camadas estudadas: 0-10 (A), 10-20 (B) e 20-30 (C). Cachoeira do Sul, 2024.



Fonte: Santos (2024)

Embora neste estudo não tenha sido encontrada correlação significativa entre a resistência do solo à penetração e a produtividade da cultura da soja, na literatura diversos são os trabalhos que comprovam sua existência. Estudo conduzido por Dalchiavon et al. (2011) demonstrou que a compactação influencia diretamente a produtividade apenas quando coincide com as principais zonas de absorção radicular ou em solos com baixa umidade. Já Ávila et al. (2013), destacam que a compactação não influencia diretamente a produtividade quando a camada compactada não coincide respectivamente com as principais zonas de absorção radicular ou em solos que mantêm um bom nível de umidade, o mesmo foi destacado no estudo conduzido por Araújo et al. (2004), no qual, os autores enfatizam que além da umidade, o teor de matéria orgânica pode reduzir o impacto da compactação na produtividade, permitindo que as plantas compensem parcialmente as limitações físicas do solo. Morando et al., (2014) destacaram em seu estudo que a disponibilidade de água no solo é um fator

determinante para o correto desenvolvimento da cultura, principalmente nos períodos entre germinação – emergência e floração – enchimento de grão, podendo impactar na resposta produtiva da cultura.

Com base nos resultados observados neste estudo e com aqueles encontrados na literatura, fica claro que a ausência de correlação espacial entre a resistência do solo à penetração e a produtividade da soja pode ser atribuída à disponibilidade de água ao longo do desenvolvimento da cultura. Neste cenário, a água se mostra mais influente que a resistência do solo à penetração, mesmo que existam limitações físicas que possam dificultar o crescimento das raízes.

4 CONCLUSÃO

A produtividade da soja apresentou variabilidade espacial na área estudada, o que permitiu a confecção de um mapa ilustrativo dos locais de maior e menor rendimento. A resistência à penetração foi mapeada em três camadas (0–10 cm, 10–20 cm e 20–30 cm), observando-se que as camadas 0–10 cm e 10–20 cm apresentaram variabilidade espacial, sendo explicadas pelos modelos esférico e gaussiano, respectivamente. Já a camada de 20–30 cm apresentou efeito pepita puro, indicando variabilidade predominantemente aleatória.

Com base no coeficiente de correlação de Pearson, não foi encontrada correlação significativa entre a produtividade da soja e a resistência do solo à penetração. Contudo, os resultados evidenciam a relevância do monitoramento da compactação em áreas sob sistema de plantio direto, uma vez que sua interação com fatores climáticos pode influenciar diretamente a produtividade. Na prática, esses resultados podem orientar a adoção de estratégias de agricultura de precisão para identificar zonas de compactação e definir manejos diferenciados, como uso localizado de práticas de descompactação ou ajuste no tráfego de máquinas, contribuindo para maior sustentabilidade e eficiência da produção agrícola.

5 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. A. et al. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférrico após treze anos de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 495-504, 2004.

ASABE – American Society of Agricultural and Biological Engineers. ASAE S313.3 FEB1999 (R2009) Soil Cone Penetrometer. *ASABE Standards 2010*. St. Joseph, p. 980-982, 2010.

ÁVILA, A. M. H. et al. Climatic restrictions for maximizing soybean yields. In: BOARD, J. E. (ed.). **A comprehensive survey of international soybean research** – Genetics, Physiology, Agronomy and Nitrogen Relationships. 1. ed. Croatia: InTech, 2013. v. 1, p. 367-375.

BETIOLI JÚNIOR, E. et al. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 971-982, 2012.

BOTTEGA, E. L. et al. Use of a multisensor platform for characterizing soil spatial variability in precision agriculture. **Ciência e Natura, Santa Maria**, v. 46, spe n. 3, e87030, 2024.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. ***Acompanhamento da safra brasileira de grãos*** – *Safra 2024/25*. Brasília, DF, v. 12, n. 5, 2024.

CORNÉLIO, V. L. et al. Métodos de posicionamento para a determinação da variabilidade espacial de atributos do solo. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, Ceres, GO, v. 24, n. 3, set. 2021.

DALCHIAVON, F. C. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e produtividade de soja em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 3, p. 911-922, 2011.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2013. 353 p.

MORANDO, R. et al. Déficit hídrico: efeito sobre a cultura da soja. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v. 3, n. especial, p. 114-129, 2014.

OLIVEIRA, Z. B. et al. Influência da irrigação suplementar na produtividade de cultivares de soja para a safra e safrinha 2018-19 e 2019-20 na região central do RS. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, p. 15580-15595, 2021.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, v. 113, p. 56-69, 2014.

PEREIRA, G. W. et al. Smart-Map: An open-source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging**. Agronomy**, v. 12, n. 6, p. 1350, 2022.

REICHERT, J. M. et al. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

RICHART, A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Intervalo hídrico ótimo e a compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 585-594, 2005.

ROSA, S. F. et al. Propriedades físicas e químicas de um Argissolo sob cultivo de *Eucalyptus dunnii* Maiden na Pampa Gaúcha. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 580-590, 2018.

SANTOS, E. L. dos. **Geoespacialização da resistência do solo à penetração e da produtividade da soja em sistema de plantio direto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, 2024.

SARI, E. D. **Geoestatística aplicada à agricultura de precisão no manejo localizado do solo**. Dissertação (Mestrado em Agricultura de Precisão) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

SILVA, G. J. et al. Análise multivariada da resistência à penetração em solo sob pastagem degradada. **Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 236-248, 2020.

SILVA, J. R. et al. Spatial variability of soil penetration resistance in areas cultivated with sugarcane under different times of mechanized harvesting with controlled traffic. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 11, n. 1, e7696, jan./mar. 2024.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918 p.

ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, v. 108, p. 1447-1454, 2016.

CAPÍTULO 48

SENSORIAMENTO PROXIMAL NA CULTURA DA MACIEIRA (*Malus domestica* BORKH.) PARA ESTABELECIMENTO DA CORRELAÇÃO ENTRE VIGOR VEGETATIVO E NDVI

Proximal sensing in apple crop (Malus domestica BORKH.) to establish the correlation between vegetative vigor and NDVI

Jardel Talamini de Abreu[1]; Luciano Gebler[2]; Eduardo Antônio Speranza[3]; Alan Cechinato Bressan[2]

[1]Universidade Federal de Santa Maria. Programa de Pós-graduação em Agricultura de Precisão- PPGAP, Av. Roraima nº 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria-RS, Brasil, Email: jtabreu7@gmail.com.
[2]Embrapa Uva e Vinho. BR 285 – Km 115, CEP: 95200-000, Vacaria-RS, Brasil, Email: luciano.gebler@embrapa.br; chechinato2@hotmail.com.
[3]Embrapa Agricultura Digital, Av. Dr. André Tosello, 209, CEP: 13083-886, Campinas-SP, Brasil, Email: eduardo.speranza@embrapa.br.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), útil para a geração de informações rápidas e precisas sobre as condições vegetativas de pomares, na orientação e na organização da mão de obra, conforme a exigência dos tratos culturais/manejo na cultura da maçã, durante o processo do desenvolvimento vegetativo da cultura. Está sendo criada uma metodologia para a geração de mapa de zonas de vigor para a cultura da macieira, correlacionando dados de NDVI (sensoriamento proximal e lateral) com o vigor da planta, mensurado pelo crescimento vegetativo de ramos, que permita orientar a organização dos serviços no pomar ainda durante a etapa de desenvolvimento vegetativo, determinando o melhor momento para realizar as leituras com o sensor. Os resultados indicam que a maior correlação entre NDVI e o crescimento vegetativo dos ramos na safra 2022/2023 foram para 35 DASD (dias após a superação da dormência) e para safra 2023/2024 foram para 34 DASD, como melhor momento para serem realizadas as leituras com o sensor proximal.

Palavras-chave: Fruticultura de precisão. Previsão de safra de maçãs. Zonas de Manejo.

ABSTRACT

This paper presents a study on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), useful for generating rapid and accurate information on the vegetative conditions of orchards, and for guiding and organizing labor according to the demands of apple cultivation/management practices during the vegetative development process. A methodology is being developed to generate a map of apple vigor zones, correlating NDVI data (proximal and lateral sensing) with plant vigor, measured by vegetative growth of branches. This allows for guiding the organization of work in the orchard even during the vegetative development stage, determining the best time to take sensor readings. The results indicate that the best correlation between NDVI and vegetative growth of branches in the 2022/2023 harvest was at 35 DASD (days after overcoming dormancy) and for the 2023/2024 harvest, at 34 DASD, as the best time to take readings with the proximal sensor.

Keywords: Precision fruit growing. Apple harvest forecast. Management zones.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

O cultivo de macieiras (*Malus domestica* BORKH.) no Brasil encontra-se situado quase que exclusivamente na região Sul, devido as características edafoclimáticas mais favoráveis ao cultivo, ainda que com características mais subtropicais do que temperada do clima (HAWERROTH; PETRI, 2019). No entanto, isso propicia o crescimento vegetativo excessivo e afeta a capacidade produtiva da macieira, que são dependentes da adubação de crescimento ou de formação, que é baseado no fornecimento de nitrogênio. Após esta fase de desenvolvimento, o manejo está diretamente envolvido no controle do vigor das plantas e para garantir a produção de frutos. Assim, o ajuste de carga é fundamental, principalmente em cultivares que apresentam alternância de produção ao longo dos ciclos produtivos, como a 'Fuji' (PETRI; NACHTIGALL; HAWERROTH, 2007). Assim, em condições que promovem o crescimento vegetativo, o uso de produtos comerciais que inibem a síntese de giberelinas representa uma estratégia eficaz para controlar o vigor da macieira, promovendo um melhor equilíbrio no ciclo produtivo (RADEMACHER, W., 2000).

A cultura da macieira, atualmente, é cultivada em sistemas de plantio com alta densidade de plantas por hectare (1000 a 4000 plantas ha $^{-1}$) (RUFATO et al., 2019). Devido ao aumento da densidade de plantio dos pomares, proporcionado pelo uso de porta-enxertos de menor vigor, podem ocorrer problemas de sombreamento entre plantas, com consequente aumento do desenvolvimento vegetativo (MEDJDOUB et al., 2004).

A região de cultivo influencia substancialmente o crescimento das plantas. Nas condições climáticas do Sul do Brasil, o período de desenvolvimento vegetativo de macieiras 'Gala' e 'Fuji' é superior ao observado em típicas regiões de clima temperado, associado a altas temperaturas e altos índices pluviométricos durante o ciclo, e pode resultar em crescimento excessivo dos ramos, sobretudo em anos de baixa frutificação (HAWERROTH; PETRI, 2014). Por essa razão, a utilização de práticas culturais que promovam o adequado balanço entre o desenvolvimento vegetativo e a frutificação da macieira são fundamentais ao aumento da eficiência produtiva e a melhoria da qualidade dos frutos. Nesse contexto, o ajuste de carga de frutos, para garantir adequado equilíbrio entre desenvolvimento vegetativo e reprodutivo é essencial para controlar o vigor.

Hoje na fruticultura, principalmente na cultura da maçã, não existe uma metodologia para a identificação do vigor vegetativo. A utilização de ferramentas aplicadas em agricultura de precisão, como os sensores proximais, podem ser uma alternativa para a criação de métodos para a identificação e mapeamento vigor vegetativo em nível de durante o ciclo vegetativo da cultura.

É necessário fornecer dados precisos sobre o vigor vegetativo para orientar o tomador de decisão na organização da mão de obra disponível em pomares conforme a exigência dos tratos culturais/manejo na cultura da maçã durante o processo vegetativo.

O objetivo deste trabalho foi criar uma metodologia para a geração de mapa de zonas de vigor vegetativo para a cultura da macieira, correlacionando dados de NDVI (sensoriamento proximal e lateral) com o vigor da planta, mensurado pelo crescimento vegetativo de ramos, que permita orientar a organização dos serviços no pomar ainda durante a etapa de desenvolvimento vegetativo.

a) Correlacionar os índices de NDVI com o vigor dado pelo crescimento vegetativo das macieiras durante seu ciclo produtivo;

b) Criar os índices de vigor (IV) durante o ciclo produtivo da macieira;

c) Gerar mapas de vigor vegetativo validados com dados reais, baseados em medições do crescimento de ramos da macieira;

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

d) Identificar o melhor momento para a utilização dos sensores proximais durante o ciclo vegetativo da cultura.

Em síntese, a aplicação de técnicas de agricultura de precisão na cultura da macieira permite identificar zonas de crescimento vegetativo, gerando mapas de índices de vigor das plantas. Esses mapas auxiliam na criação de zonas de manejo, orientando as decisões do produtor para otimizar a gestão da mão de obra no pomar durante a safra e possibilitando o zoneamento precoce para previsão de colheitas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área experimental corresponde a do pomar de macieira, nomeado Fitotecnia, que contém a cultivar Maxi Gala, com 13 anos de idade, localizados na Estação Experimental de Fruticultura de Clima Temperado da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Uva e Vinho (28°30’58.2”S, 50°52’52.2”W) localizada a 994 metros de altitude no município de Vacaria – RS, (Figura 1).

Figura 1: Localização da área de estudo.



Fonte: Adaptado de Google Maps (2025).

O clima na região é considerado Cfb, do tipo subtropical úmido de acordo com a classificação de Köppen (PEEL et al, 2007). A característica do clima é de verões amenos e invernos frios, com média de temperatura máxima de 25ºC e de temperatura mínima de 15ºC.

ISBN 978-65-990392-6-3

A precipitação ocorre de forma bem distribuída ao longo do ano, com média de 1.400 mm/ano, de acordo com dados da estação meteorológica do INMET.

Os biomas e as culturas agrícolas que se apresentam na região, são em grande parte, uma expressão do clima. Destaca-se: o bioma Mata Atlântica, com grande diversidade genética e florestas compostas por diversos estágios de sucessão, em uma região que se apresenta com maior disponibilidade hídrica no verão e menor disponibilidade no inverno (WREGER et al. 2012). Em Vacaria, são frequentemente encontrados Latossolos Brunos Distróficos húmicos (LBdh), Latossolos Brunos Alumínicos típicos, Latossolos Amarelos Distróficos típicos (LAdt) e Latossolos Vermelhos Distróficos típicos (LVdt) e Húmicos (LVdh). Caracterizam-se por serem solos profundos, bem drenados, com baixa a média fertilidade natural (muitas vezes ácidos e com baixa saturação por bases), mas com boa capacidade de retenção de água e estrutura granular (SANTOS et al., 2018).

2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados

Para capturar a resposta espectral da cultura, as leituras de NDVI foram obtidas usando o sensor óptico ativo FLEXUM FXM2050 (Figura 2), posicionado a cerca de 1 metro de distância do dossel, de acordo com as especificações do equipamento (Tabela1) e operado lateralmente ao longo das fileiras a 7 km/h, com foco na zona média de emergência dos ramos.

Figura 2: Sensor óptico ativo FLEXUM, modelo FXM2050 da Falker.



Fonte: Autores (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 2 - Especificações Técnicas do Sensor FLEXUM, modelo FXM2050 da Falker.

Área de medição	círculo de 1 m de diâmetro
Distância de medição	60cm a 1m das plantas
Escala de Medição	NDVI (0 a 1)
Tipo de medição	Ativa
Tipo de emissão de luz	LEDs
Leituras Contínuas	1 leitura por segundo
Temperatura de operação	0 até 50 ºC
Formato de exportação de dados	ShapeFile e CSV
Conexão com FieldBox	Até 4 sensores
Alimentação	12V
Dimensões	295 x 137 x 75 mm
Peso	1.4 kg

Fonte: Falker (2025).

As leituras com o sensor Flexum foram realizadas na parte mediana das plantas (Figura 3), entre o 1º e o 3º arame do tutoramento do pomar, a uma altura média de 1,60m. O 2º arame do tutoramento de cada pomar (Mediano) foi o guia para orientar a altura das leituras no campo, área onde se concentra o maior vigor e a produção da macieira. O círculo amarelo na (Figura 3) representa a área de leitura onde o sensor Flexum faz durante a passagem proximal do mesmo.

Figura 3: Parte mediana das plantas de macieira (*Malus domestica*. Borkh.) variedade Gala cultivada em Vacaria-RS (linhas vermelhas indicando a posição dos fios de arame do sistema de tutoramento). O círculo amarelo representa a área de leitura do sensor Flexum e a medição do crescimento vegetativo do ramo na safra.

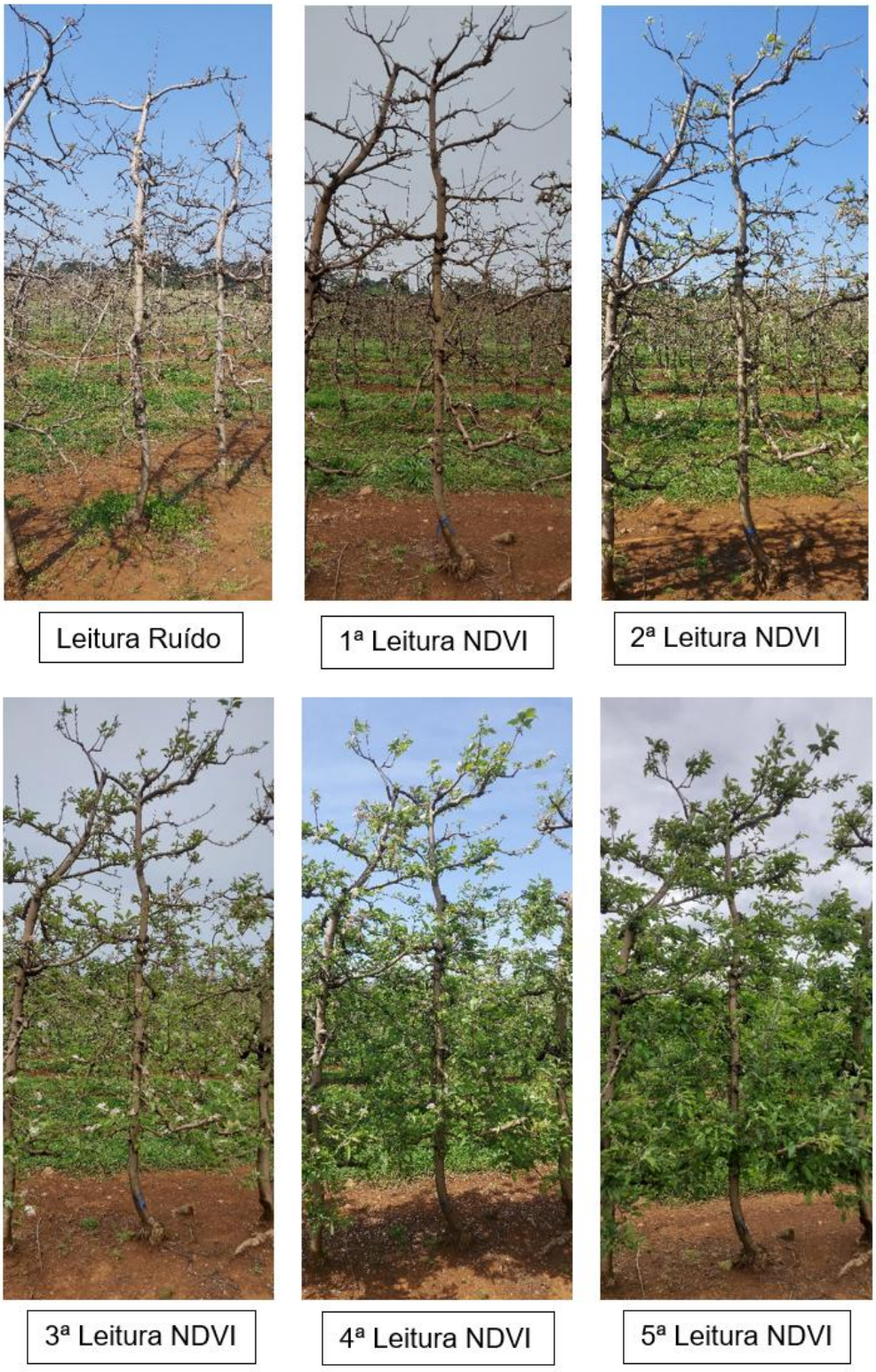


Fonte: Autores (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

Também foi possível gerar o registro fotográfico referente à linha temporal de crescimento vegetativo do pomar, pela evolução do desenvolvimento das macieiras no campo ao longo do ciclo (Figura 4):

Figura 4: A evolução da biomassa das macieiras no campo ao longo dos ciclos 2022/2023 e 2023/2024, registrado em fotos.



ISBN 978-65-990392-6-3



6ª Leitura NDVI



7ª Leitura NDVI



8ª Leitura NDVI



9ª Leitura NDVI



10ª Leitura NDVI



11ª Leitura NDVI

ISBN 978-65-990392-6-3



Fonte: Autores (2025).

Na Tabela 2, está a descrição dos estádios fenológicos da macieira em que foram feitas as leituras do NDVI e a medição do crescimento dos ramos, nas safras 2022/2023 e 2023/2024, que compreende do estádio A até o estádio J, para melhor ilustrar o momento da coleta dos dados no campo, em cada safra.

Tabela 2: Tabela dos estádios fisiológicos da macieira e período das leituras do NDVI e medição do crescimento vegetativo dos ramos na safra 2022/2023 e na safra 2023/2024.

Leituras	DASD	Estádio	Marcador Morfofisiológico	Subfase	Fase de Desenvolvimento
Ruído	21	A	Gema Dormente	Dormência	Repouso
	21	B	Gema Inchada		
1ª Leitura	31	C	Pontas Verdes		
2ª Leitura	35	C3	Meia Polegada Verde	Brotação	Vegetativa
3ª Leitura	42	D	Meia Polegada Verde Sem Folhas		
4ª Leitura	51	D2	Meia Polegada Verde Com Folhas		
5ª Leitura	55	E	Botão Verde		
6ª Leitura	62	E2	Botão Rosado	Floração	
7ª Leitura	72	F	Início da Floração		
8ª Leitura	78	F2	Plena Floração		Reprodutiva
9ª Leitura	85	G	Final da Floração		
10ª Leitura	92	H	Queda de Pétalas	Frutificação	
11ª Leitura	98	I	Frutificação Efetiva		
12ª Leitura	108	J	Frutos Verdes		
13ª Leitura	112	J	Frutos Verdes		

Fonte: Autores (2025). Adaptado de Bender, 1986.

ISBN 978-65-990392-6-3

Em 42 plantas de macieiras, quatro ramos do ano corrente foram marcados com fita plástica e medidos semanalmente com uma régua de 30 cm (Figura 5). As medições foram feitas nas mesmas datas e na mesma zona do dossel que as leituras do NDVI para garantir o alinhamento espacial (Figura 3). Mapas contínuos de NDVI e crescimento vegetativo foram gerados usando técnicas de interpolação espacial: krigagem com o pacote *autokrige* em R e modelagem Support Vector Machine (SVM) via plugin *SmartMap* no QGIS 3.34.4. Os mapas NDVI foram normalizados subtraindo-se os valores residuais correspondentes. Finalmente, a análise de correlação de Pearson foi usada para avaliar a correlação entre NDVI e o crescimento vegetativo dos ramos nas datas de coleta em ambos os estádios de desenvolvimento da cultura.

Figura 5: Medição do crescimento vegetativo dos ramos do ano de macieira, das safras 2022/2023 e 2023/2024, em Vacaria-RS, Brasil.



Fonte: Autores (2025).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

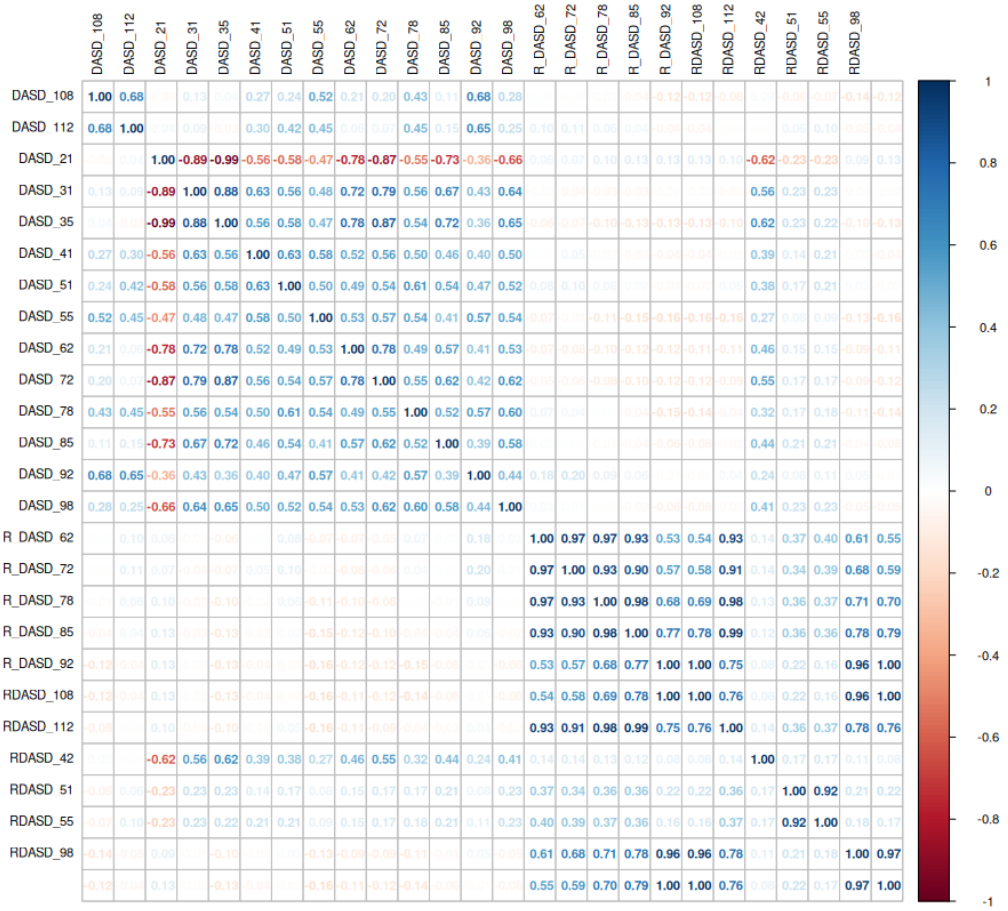
O teor relativo de clorofila pode variar devido a diferenças na estrutura e anatomia foliar, estádio fenológico, posição/idade da folha na planta, condição da planta, ano de avaliação, dentre outros (AMARANTE et al., 2009; TECCHIO et al., 2011). Estes autores obtiveram resultados satisfatórios para o teor relativo de clorofila com uso do SPAD (Soil Plant Analysis Development - Desenvolvimento de Análise de Plantas de Solo). Miele et al. (2010) e Gebler (2022) utilizaram o teor relativo SPAD para demonstrar a variabilidade espacial do vigor de plantas em videiras, realizando diversas coletas de dados em pontos georreferenciados no vinhedo e gerando mapas por interpolação, (FERREIRA et al. 2024).

Os resultados deste trabalho, iniciaram na safra 2022/2023 com a quebra de dormência do pomar Fitotecnia na data de 23 de agosto de 2022, dando início a contagem dos DASD

(Dias Após a Superação da Dormência). Isso é uma informação importante para contextualizar qualquer análise ou resultado que venha a seguir, pois estabelece o ponto de partida do ciclo de desenvolvimento das plantas ou das observações realizadas.

Foram realizadas as análises utilizando o Coeficiente de Correlação de Pearson entre as datas de leituras do NDVI e as datas de leituras do comprimento de ramos, para representar o grau de correlação entre as duas variáveis métricas na safra 2022/2023, de acordo com a (Tabela 3).

Tabela 3: Coeficiente de Correlação de Pearson entre as leituras do NDVI e as medidas de comprimento de ramos da macieira na safra 2022/2023.



Fonte: Autores (2025).

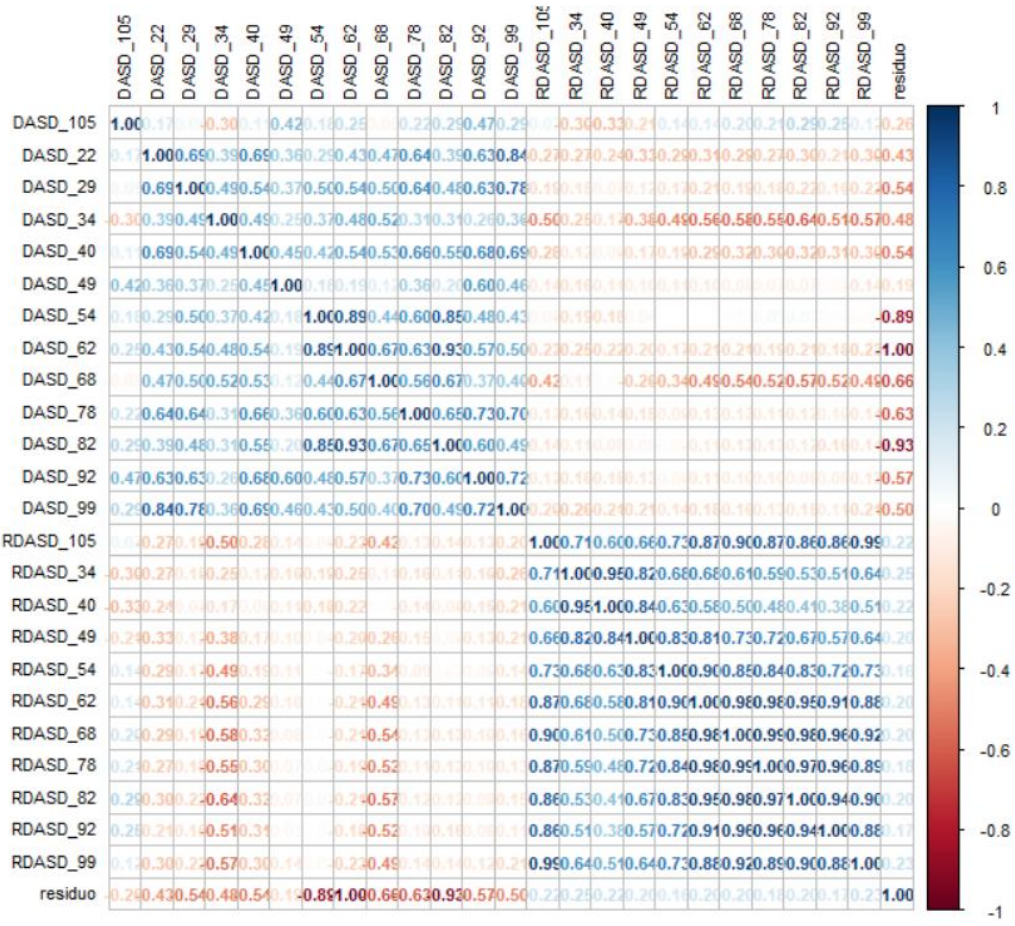
Na safra 2022/2023, a correlação foi de (R = 0,62) indicando uma correlação positiva moderada a forte entre as variáveis analisadas, observada entre o NDVI aos 35 dias após a saída de dormência (DASD) e o alongamento dos ramos aos 42 DASD, provavelmente devido às condições estáveis de crescimento inicial e baixa precipitação, que reduziram a saturação do NDVI.

Na safra 2023/2024, os trabalhos iniciaram com a quebra de dormência do pomar Fitotecnia na data de 30 de agosto de 2023, dando início a contagem dos DASD (Dias Após a Superação da Dormência). Isso é uma informação importante para contextualizar qualquer

análise ou resultado que venha a seguir, pois estabelece o ponto de partida do ciclo de desenvolvimento das plantas ou das observações realizadas.

Foram realizadas as análises utilizando o Coeficiente de Correlação de Pearson entre as datas de leituras do NDVI e as datas de leituras do comprimento de ramos, para representar o grau de correlação entre as duas variáveis métricas na safra 2023/2024, de acordo com a (Tabela 4).

Tabela 4 - Coeficiente de Correlação de Pearson entre as datas de leituras do NDVI e as datas de leitura de comprimento de ramos na safra 2023/2024.

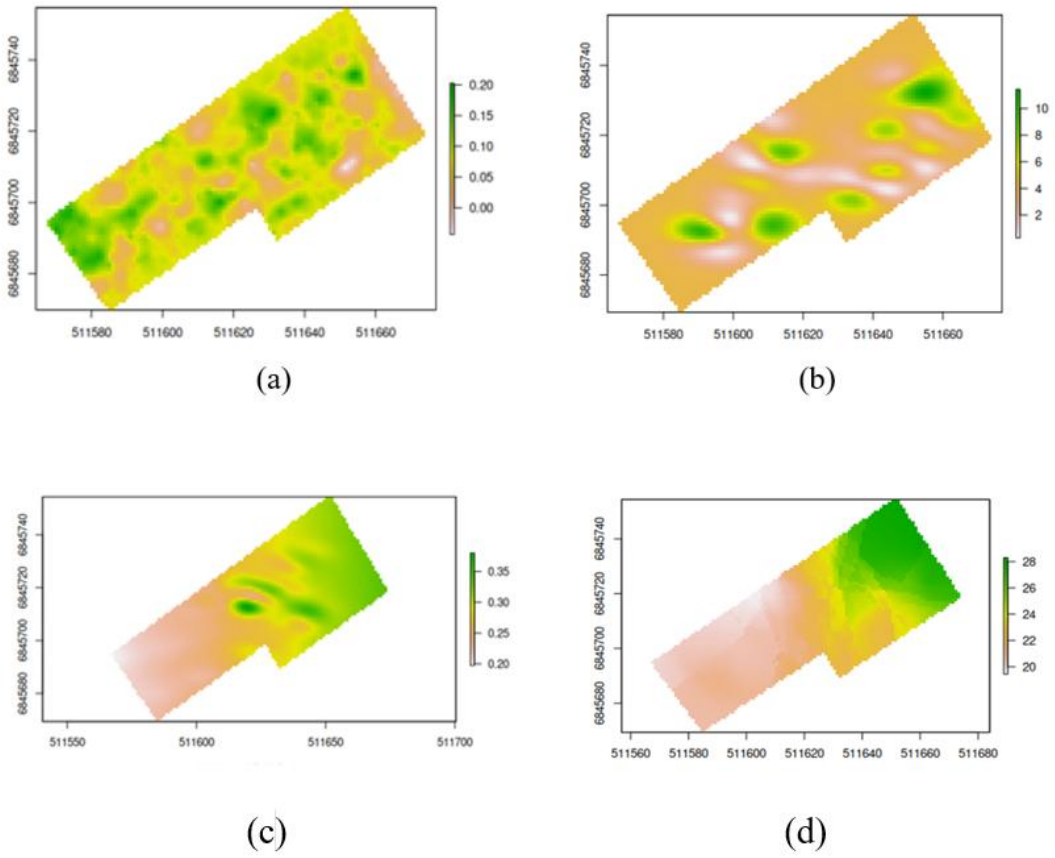


Fonte: Autores (2025).

Em 2023/2024, a maior correlação (R = -0,64) ocorreu entre NDVI em 34 DASD e comprimento absoluto de ramificação em 82 DASD, revelando uma relação inversa: árvores com maiores valores iniciais de NDVI tenderam a ter ramos mais curtos mais tarde, sugerindo vigor precoce redirecionado para o desenvolvimento de frutos. Por outro lado, o menor NDVI inicial foi associado a um maior crescimento vegetativo, possivelmente como uma estratégia compensatória para restaurar a área fotossinteticamente ativa. Essas dinâmicas, refletidas na distribuição espacial do tamanho dos frutos e do vigor vegetativo, destacam a utilidade do mapeamento de vigor baseado em NDVI para o manejo informado do dossel e a identificação precoce de zonas de produção em pomares (Figura 6).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 6: Mapa NDVI aos 35 DASD (a) e vigor vegetativo baseado no crescimento dos ramos em cm aos 42 DASD (b), mostrando a correlação mais forte durante a safra 2022/2023 e aos 34 DASD (c) e vigor vegetativo baseado no comprimento dos ramos em cm aos 82 DASD (d), mostrando a correlação mais forte (negativa) na safra 2023/2024.



Fonte: Autores (2025).

4 CONCLUSÃO

Os resultados revelam um padrão temporal e espacial consistente de desenvolvimento vegetativo em duas estações de crescimento. As maiores correlações entre NDVI e crescimento vegetativo foram observadas em torno de 35–42 DASD em 2022/2023 e 34–82 DASD em 2023/2024. Esses achados indicam que as leituras de NDVI feitas por volta da quinta semana após a quebra da dormência podem produzir mapas confiáveis para identificar o vigor vegetativo. Essa detecção precoce apoia decisões estratégicas no manejo do dossel e no delineamento da zona de produção, aumentando a eficiência do manejo da cultura.

É importante dar continuidade ao trabalho sobre o vigor da cultura, para que as próximas safras possam corroborar com as informações já coletadas e assim confirmar as datas identificadas na safra 2022/2023 e na safra 2023/2024 durante o ciclo vegetativo e reprodutivo, para indicar o melhor momento para uma tomada de decisão assertiva no manejo durante a safra em andamento.

ISBN 978-65-990392-6-3

REFERÊNCIAS

AMARANTE, C. V. T. do; STEFFENS, C. A.; MIQUELOTO, A.; ZANARDI, O. Z.; SANTOS, H. P. dos. Disponibilidade de luz em macieiras 'Fuji' cobertas com telas antigranizo e seus efeitos sobre a fotossíntese, o rendimento e a qualidade dos frutos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 31, n. 3, p. 664-670, 2009.

BENDER, R. J. Botânica e fisiologia. In: EMPRESA CATARINENSE DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual da cultura da macieira. Florianópolis: EMPASC, 1986. p. 26-49.

FALKER. (Acesso em 07 de Fevereiro de 2025). Falker. Fonte: www.falker.com.br

FERREIRA, R. A.; CARVALHO, L. F. D.; FOGACA, A. O. ; AMARAL, L. P. ; GEBLER, L. ; AMADO, T. J. C. . Análise da variabilidade espacial e zonas de produtividade em vinhedos, no vale central gaúcho. **Nativa**, v. 11, p. 297-308, 2023.

GEBLER, L. et al. Variabilidade espacial do teor relativo de clorofila em videiras na vinícola Velho Amâncio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 26., 2022, Florianópolis. **Anais do** .... Florianópolis: Sociedade Brasileira de Fruticultura, 2022. v. 26. p. 1125-1128.

HAWERROTH, F. J.; PETRI, J. L. Crescimento vegetativo de macieiras 'Fuji Suprema' sob influência da época de aplicação de proexadiona calcica. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 36, n. 2, p. 373-380, 2014.

HAWERROTH, F. J.; NACHTIGALL, G. R. **Telas antigranizo na cultura da macieira**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2019. (Folder).

HIEMSTRA, P. L., VAN LEEUWEN, A. P. M., & VAN DER VEEN, B. (2008). autokrige: An R package for automatic geostatistical analysis. **Journal of Statistical Software**, 27(8), 1-22.

MEDJDOUB, R.; VAL, J.; BLANCO, A. Inhibition of vegetative growth in red apple cultivars using prohexadione-calcium. **Journal of Horticultural Science and Biotecnology**, Kent, v. 2, p. 63-271, 2004.

MIELE, A. et al. Viticultura de Precisão: uma ferramenta tecnológica para melhorar a qualidade e a competitividade do vinho brasileiro. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2010. **Anais do ...**, Ribeirão Preto, 2010.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; McMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. ***Hydrology and Earth System Sciences***, v. 11, n. 5, pág. 1633–1644, 2007.

PEREIRA, R. H. S., & CAMARGO, L. A. (2017). SmartMap: um plugin para QGIS para modelagem preditiva em geociências. In Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR).

PETRI, J. L.; NACHTIGALL, G. R.; HAWERROTH, F. J. **Raleio químico e manual de frutos de macieira**. Lages: EPAGRI, 2007. (Boletim Técnico, 137).

RADEMACHER, W. (2000). Growth retardants: Effects on gibberellin biosynthesis and other metabolic pathways. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, 51, 501-531

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque/RS · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

SANTOS, H. G. dos et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5 ad. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro. 2018.

RUFATO, L.; MARCHIORETTO, L.R.; ORLANDI, J.C.; MICHELON, M.F.; ROSSI, A.D.; SANDER, G.F.; MACEDO, T.A. Lateral branch induction at nursery with growth regulators in 'Maxi Gala' apple trees grafted on four rootstocks. **Scientia Horticulturae**, New York, v.253, p.349-57, 2019. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.045

TECCHIO, M. A. et al. Teores foliares de nutrientes, índice relativo de clorofila e teores de nitrato e de potássio na seiva do pecíolo na videira 'Niagara rosada'. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, n. 2, p. 649-659, 2011.

WREGE, Marcos Silveira et al. (Org.). **Atlas climático da Região Sul do Brasil**: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2012.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 49

RELAÇÃO ENTRE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO, COMPONENTES DE RENDIMENTO E PRODUTIVIDADE DA SOJA: UMA ANÁLISE ESPACIAL

Relationship between soil apparent electrical conductivity, yield components and soybean yield: a spatial analysis

Régis Ruoso[1a*]; Eduardo Leonel Bottega[2]; Zanandra Boff de Oliveira[2]; Fernando Coelho Eugenio[3]; Mirta Teresinha Petry[1]; Gustavo Bock Bernhard[4]; Juliano Dalcin Martins[1]

[1] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), PPGEA, Av. Roraima 1000 – Camobi, 97105-000, Santa Maria – RS, Brasil, regisruoso@hotmail.com, mirta.petry@gmail.com
[2] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Colégio Politécnico, PPGAP, Av. Roraima 1000 – Camobi, 97105-000, Santa Maria – RS, Brasil, eduardo.bottega@ufsm.br, zanandra.oliveira@ufsm.br, juliano.martins@ufsm.br
[3] Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), PPGCF, Rodovia MGT 367, Km 583, Alto Jacuba, 39100-000, Diamantina – MG, Brasil, fernando.eugenio@ufvjm.edu.br
[4] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), campus de Cachoeira do Sul, Rod. Taufik Germano 3013 – Universitário II, 96503-205, Cachoeira do Sul – RS, Brasil, gustavo.bernhard@acad.ufsm.br
[a] Parte do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Agrícola (UFSM); *Autor correspondente

RESUMO

A agricultura digital tem avançado com tecnologias que permitem coletar e analisar dados agrícolas em alta escala e qualidade. A condutividade elétrica aparente (CEA) do solo tem boa correlação com atributos ligados à produtividade. Este estudo visou mapear a variabilidade espacial da produtividade da soja, seus componentes e a CEA do solo. As variáveis população de plantas, plantas por metro e vagens por planta não apresentaram variabilidade espacial. Já o peso de mil grãos, a produtividade e a CEA mostraram variabilidade, descrita por modelos de semivariância. Observou-se forte correlação espacial entre CEA, peso de mil grãos e produtividade. O agrupamento Alto-Alto entre CEA e peso de mil grãos foi significativo em 34,26% da área. Já o agrupamento Baixo-Baixo entre CEA e produtividade ocorreu em 37,10% da área. Para peso de mil grãos e produtividade, 54,90% da área apresentou agrupamento não significante. A análise espacial ajuda a entender a distribuição da produtividade. Os mapas gerados podem orientar a coleta localizada de solo. Isso contribui para o planejamento de safras e definição de zonas de manejo.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. *Glycine max* (L.) Merr. Variabilidade espacial.

ABSTRACT

Digital agriculture has increasingly incorporated technologies capable of collecting, storing, and analyzing large volumes of high-quality field data. Among these technologies, the apparent electrical conductivity (ECa) of the soil has shown strong correlation with soil attributes directly or indirectly related to crop yield. This study aimed to map the spatial variability of soybean yield components, productivity, and soil ECa, as well as to analyze the spatial correlation among these variables. Results showed no spatial variability for plant population, plants per meter, and pods per plant. However, the thousand-grain weight, yield, and ECa presented spatial variability, modeled by linear with sill and spherical semivariograms. Strong spatial correlation was observed between ECa, thousand-grain weight, and soybean yield. Significant spatial clusters, such as High-High and Low-Low, were identified for specific variable pairs. The generated spatial maps can support the delineation of management zones and guide targeted soil sampling, contributing to improved crop planning and soil fertility characterization.

Keywords: Precision Agriculture. *Glycine max* (L.) Merr. Spatial variability.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

A soja desempenha um papel vital na economia global. É uma das commodities agrícolas mais negociadas e possui uma ampla gama de usos, incluindo a produção de óleo, farelo, alimentos processados, rações para diferentes espécies animais e biocombustíveis. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), a produção global de soja excedeu 371 milhões de toneladas em 2020, gerando um valor econômico significativo (FAO, 2021).

Ferramentas que possibilitam mapear os componentes de rendimento da soja podem auxiliar o produtor a melhorar o manejo da cultura, buscando incrementar a produtividade. A agricultura de precisão, neste contexto, tem desempenhado um papel crucial na melhoria do sistema produtivo da soja, proporcionando benefícios significativos aos agricultores. O uso de ferramentas de agricultura de precisão como sensores, sistemas de posicionamento global por satélite (GNSS) e imagens de satélite, tem permitido um monitoramento mais detalhado das condições do solo e das plantas, bem como uma aplicação mais eficiente de insumos agrícolas. Essa abordagem tem contribuído para o aumento da produtividade da soja, a redução do desperdício de recursos e a melhoria da sustentabilidade do sistema agrícola.

Outro fator importante na aplicação da agricultura de precisão é conhecer e mensurar a autocorrelação espacial entre atributos e/ou variáveis relacionadas ao desempenho produtivo dos cultivos. A autocorrelação espacial trata-se de uma medida estatística que avalia a relação entre os valores de uma variável em locais geograficamente próximos. Na agricultura de precisão, a autocorrelação espacial é usada para identificar padrões e variabilidades no campo, permitindo uma tomada de decisão mais assertiva em relação ao manejo das culturas. Essa análise espacial auxilia na compreensão da variabilidade espacial dos atributos do solo e das plantas, fatores relevantes para um manejo agrícola mais assertivo.

A variabilidade de atributos do solo pode ser indicada pelo mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo, na camada de 0-20 cm (CE20). Na agricultura, a CE20 tem sido amplamente utilizada como uma ferramenta para avaliar a variabilidade espacial das propriedades do solo, como teor de umidade, salinidade e textura, e sua relação com a produtividade das culturas (BOTTEGA et al. 2022; JOHNSON et al. 2005). A análise da CE20 pode fornecer informações valiosas sobre a heterogeneidade do solo, permitindo um manejo mais preciso e eficiente na aplicação de corretivos e fertilizantes e estratégias de manejo mais eficientes para melhorar a produtividade das culturas.

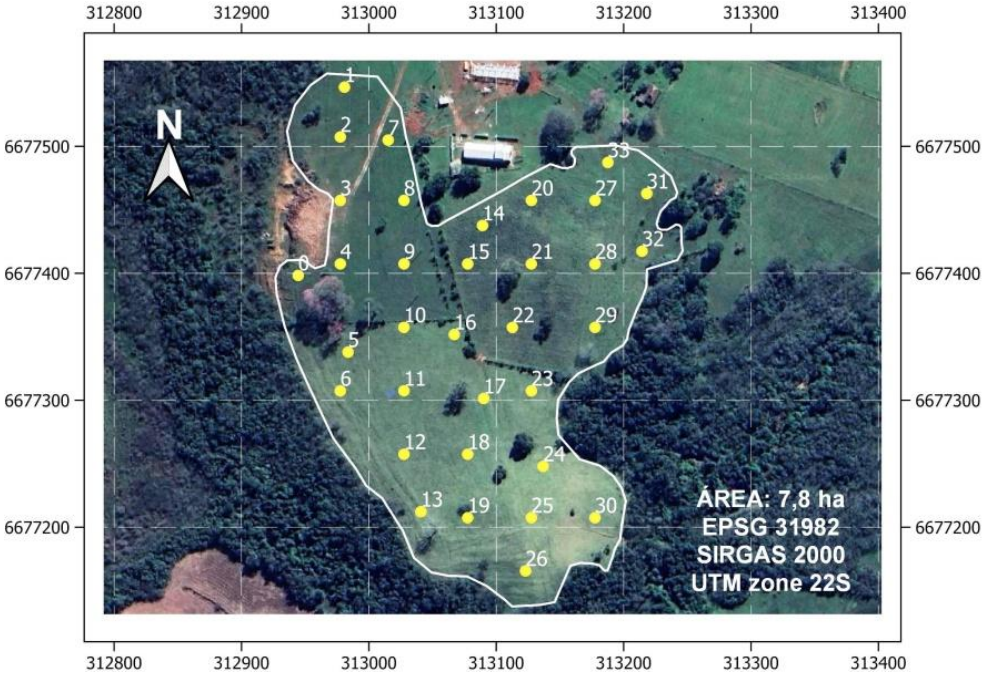
Diante do exposto, o presente trabalho teve por objetivo geral estudar a autocorrelação espacial entre a condutividade elétrica aparente do solo, componentes de rendimento e produtividade da cultura da soja. Os objetivos específicos deste estudo foram: mapear a variabilidade espacial dos componentes de rendimento da cultura da soja, da produtividade e da condutividade elétrica aparente do solo. Estudar a correlação espacial entre os componentes de rendimento, a produtividade e a condutividade elétrica aparente do solo. Fornecer informações capazes de contribuir no planejamento de safras futuras.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado na área experimental da UFSM – Cachoeira do Sul. O clima, segundo a classificação de Köppen, é subtropical (CFa) com clima úmido e verão quente. O solo é classificado como Argissolo vermelho (EMBRAPA, 2013). A área de estudo apresenta coordenadas centrais 30°01’13” de latitude Sul e 52°56’18” de longitude Oeste e possui 7,83 hectares. Nela foi estabelecida uma grade amostral composta por 34 pontos, espaçados em 50

metros, representando uma densidade de 4,3 pontos por hectare. A grade amostral foi gerada no Sistema de Informação Geográfica (SIG) Quantum GIS (QGIS Development Team, 2020), versão 3.10.11 (A Coruña), utilizando a ferramenta Vetor >>> Investigar >>> Criar grade. A grade de pontos foi exportada para um receptor GPS da marca Garmin, modelo GPSMAP 62sc, utilizado na localização dos pontos amostrais nas áreas de estudo. Na Figura 1 é apresentado o polígono da área de estudo e os pontos amostrais.

Figura 3 – Polígono delimitador da área de estudo e grade de pontos amostrais. Cachoeira do Sul, 2023.



Fonte: Autores.

Os pontos amostrais serviram de base para estruturação do banco de dados, utilizado nas análises estatísticas e geoestatísticas subsequentes. Em cada um dos 34 pontos foram colhidas, de forma manual, as plantas presentes em duas linhas de soja, com um metro de comprimento e espaçamento entre linhas de 0,45 metros, totalizando 0,9 m^2 de área colhida. No momento da colheita, registrou-se o número de plantas presentes em 0,9 m^2. As plantas foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados e encaminhadas para laboratório. Procedeu-se a contagem do número de vagens por planta (em quatro plantas por ponto amostral), mensurou-se o peso de mil grãos (utilizando uma balança analítica) e estimou-se a produtividade (extrapolando a massa colhida para 1 hectare). Na estimativa da produtividade corrigiu-se a umidade dos grãos para 13%, sendo este fator mensurado com auxílio de um medidor universal de umidade.

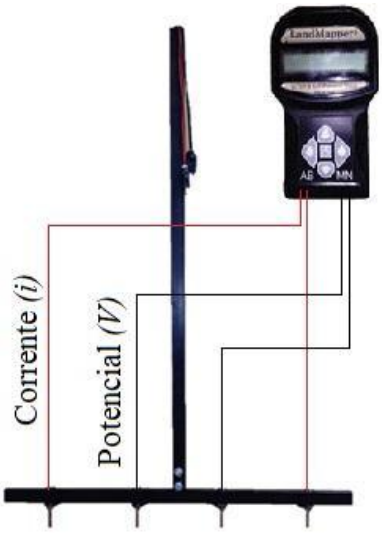
A cultura semeada na área de estudo foi a cultura da soja. Foram semeadas as cultivares AS 3615 I2X da Agroeste. A cultivar AS 3615 I2X, pertencente ao grupo de maturação 6.1, apresenta hábito de crescimento indeterminado e tecnologia Intacta2 Xtend®, com alto potencial produtivo (AGRO BAYER, 2023). A semeadura ocorreu no dia 06/12/2022 e a colheita manual foi realizada em 12/04/2023. A semeadura da soja foi realizada sob resteva de aveia branca, dessecada 20 dias antes da implantação da cultura.

A condutividade elétrica aparente do solo (CE20, $m^S\ m^{-1}$) foi mensurada por meio da introdução no solo quatro eletrodos igualmente espaçados horizontalmente em 0,20 m,

ISBN 978-65-990392-6-3

objetivando, assim, mediar a CE20 representativa da camada de solo de 0,0 – 0,20 m. A configuração e montagem dos eletrodos foi com base na matriz de Wenner (CORWIN; HEDRICKX, 2002; CORWIN; LESH, 2003). Para as leituras de CE20 foi utilizado um medidor de condutividade elétrica portátil, marca Landviser®, modelo LandMapper® ERM-02. Na Figura 2 são apresentados o medidor portátil e a matriz, com os eletrodos.

Figura 4 – Matriz de Wenner e medidor de condutividade elétrica portátil, marca Landviser®, modelo LandMapper® ERM-02. Cachoeira do Sul, 2023. *Imagem ilustrativa, sem escala.



Fonte: Adaptado de BOTTEGA et al. (2022).

A matriz Wenner foi constituída de uma armação em formato de “T”, com tubos de metalon, parafusos de aço (eletrodos) e fios flexíveis de cores diferentes. Os fios vermelhos foram conectados aos eletrodos de corrente e os fios pretos aos eletrodos de potencial. Para garantir confiabilidade nas leituras, o contato dos parafusos com a armação de metalon foi devidamente isolado, sendo estes, revestidos com mangueira de PVC. A resistividade obtida utilizando a Matriz de Wenner foi calculada pela Equação 1.

$$\rho = \frac{2\pi a \Delta V}{i} \quad (1)$$

Onde: ρ = Resistividade, Ohm m^{-1}; a = Espaçamento entre eletrodos, m; ΔV = Diferença de potencial medida, V; e i = Corrente elétrica aplicada, A.

A condutividade elétrica aparente do solo representa o inverso da resistividade, sendo calculada utilizando a Equação 2.

$$CE20 = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

Onde: CE20 = Condutividade elétrica aparente do solo, mS m^{-1}.

ISBN 978-65-990392-6-3

No momento das leituras de CE20, foram retiradas amostras de solo (0,0-0,20cm) para determinação da umidade do solo. As amostras foram coletadas utilizando um trado holandês, sendo o mesmo coletado e acondicionado em cápsula de alumínio, devidamente identificados e levados para o laboratório. Para estimativa de umidade no solo, foi utilizado o método gravimétrico (padrão estufa). As amostras foram pesadas ainda úmidas, colocadas em estufa a 105°C por 24h e pesadas após estarem secas. Tanto do peso úmido quanto do peso seco foi descontado o peso da cápsula de alumínio.

Após estruturado o banco de dados, procedeu-se as análises estatística e geoestatística. Na análise estatística, foram calculados o valor mínimo, média, valor máximo, desvio padrão e coeficiente de variação, a fim de caracterizar os dados. Na análise geoestatística, primeiramente calculou-se o Índice de Moran (I) univariado (P.Value<0,05 para 999 permutações), para identificar dentre as variáveis estudadas, que apresentavam autocorrelação espacial significativa, indicativo da existência de variabilidade espacial. Para as variáveis com I significativo, foram modelados, ajustados e validados os semivariogramas, a fim de caracterizar a variabilidade espacial dos dados. Após ajustado e validado o modelo, foi realizada a interpolação dos valores para predição em locais não amostrados. O método de validação adotado foi o da validação cruzada e a interpolação de valores foi realizada por krigagem ordinária que, de acordo com Oliver; Webster (2014) fornece as melhores previsões lineares sem viés.

A análise da variabilidade espacial foi realizada no QGIS, utilizando o plugin Smart-Map, desenvolvido por Pereira et al. (2022). O Smart-Map possibilita a predição e o mapeamento de atributos do solo. Permite a interpolação dos dados utilizando Krigagem Ordinária e técnicas de *Machine Learning* por meio do algoritmo Support Vector Machine (SVM). Na Figura 3 está representado o fluxograma de processamento dos dados.

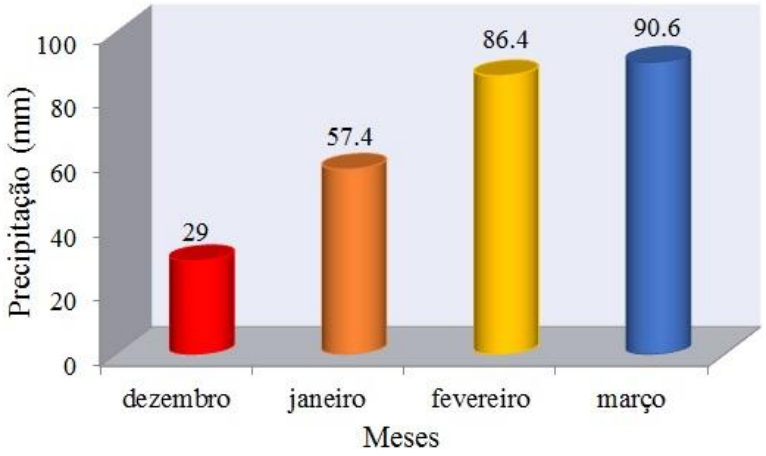
A correlação espacial entre as variáveis foi medida calculando-se o coeficiente de autocorrelação espacial global bivariado, cujo objetivo é descobrir se o valor de um atributo observado numa dada região está relacionado espacialmente com os valores de outra variável observada em regiões vizinhas (ALMEIDA, 2012). O teste empregado foi a versão bivariada da estatística I de Moran, denominada índice de Moran bivariado. De acordo com Anselin et al. (2003) essa estatística dá uma indicação do grau de associação linear (positiva ou negativa) entre o valor para uma variável em uma dada locação *i* e a média de uma outra variável nas locações vizinhas j. O índice de Moran bivariado foi calculado utilizando o software GeoDa (ANSELIN; SYABRI; KHO, 2005), no mesmo software foram gerados os diagramas de dispersão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 é apresentado o gráfico referente a precipitação pluviométrica (mm) registrada na área de estudo durante o ciclo da cultura da soja. A semeadura ocorreu no mês de dezembro, o qual apresentou a menor precipitação pluviométrica, comprometendo o estabelecimento do dossel de plantas.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 5 – Precipitação pluviométrica (mm) registrada na área de estudo durante o ciclo da cultura da soja. Cachoeira do Sul, 2023



Fonte: Autores.

De acordo Kuss (2006), períodos de estiagem ou veranicos prejudicam o desenvolvimento da cultura da soja, em especial quando a mesma encontra-se nos estádios de desenvolvimento da floração a maturação fisiológica de grãos, considerado período crítico de maior necessidade hídrica, correspondente a 7,5 mm dia^{-1}. No presente estudo, a cultura da soja encontrava-se no período de maior necessidade hídrica nos meses de fevereiro e março, nos quais a precipitação pluviométrica não atendeu a necessidade hídrica necessária de 7,5 mm dia^{-1}, sendo observada a média de 3,09 mm dia^{-1} para o mês de fevereiro e 2,92 mm dia^{-1} para o mês de março.

Na Tabela 1 é apresentado o resultado da estatística descritiva das variáveis: população de plantas (plantas ha^{-1}), plantas por metro, vagens por planta, peso de mil grãos (g), produtividade de soja (kg ha^{-1}) e condutividade elétrica aparente do solo (CE20, mS m^{-1}). Foi observado para as variáveis vagens por planta e CE20 os maiores coeficientes de variação (CV%), sendo eles 44,33 e 44,03% respectivamente.

Tabela 3 – Estatística descritiva das variáveis população de plantas (plantas ha^{-1}), plantas por metro, vagens por planta, peso de mil grãos (g), produtividade de soja (kg ha^{-1}) e condutividade elétrica aparente do solo (CE20, mS m^{-1}). Cachoeira do Sul, 2023.

Variáveis	Mínimo	Média	Máximo	Desvio padrão	CV (%)
População de plantas (plantas ha^{-1})	122.22	198.03	300.00	39.494,62	19,94
Plantas por metro	6	9	14	1,78	19,94
Vagens por planta	27	54	138	23,84	44,33
Peso de mil grãos (g)	106	126	155	13,03	10,34
Produtividade de soja (kg ha^{-1})	1.279	2.686	4.364	690,50	25,71
CE20 (mS m^{-1})	1	4	9	1,64	44,03

Fonte: Autores.

Estes elevados CV (%) podem ter sido ocasionados por fatores do solo que afetam o desenvolvimento da soja e o comportamento elétrico do solo, sendo estes mais expressivos em determinados pontos de amostragem em relação a outros (comportamento em manchas).

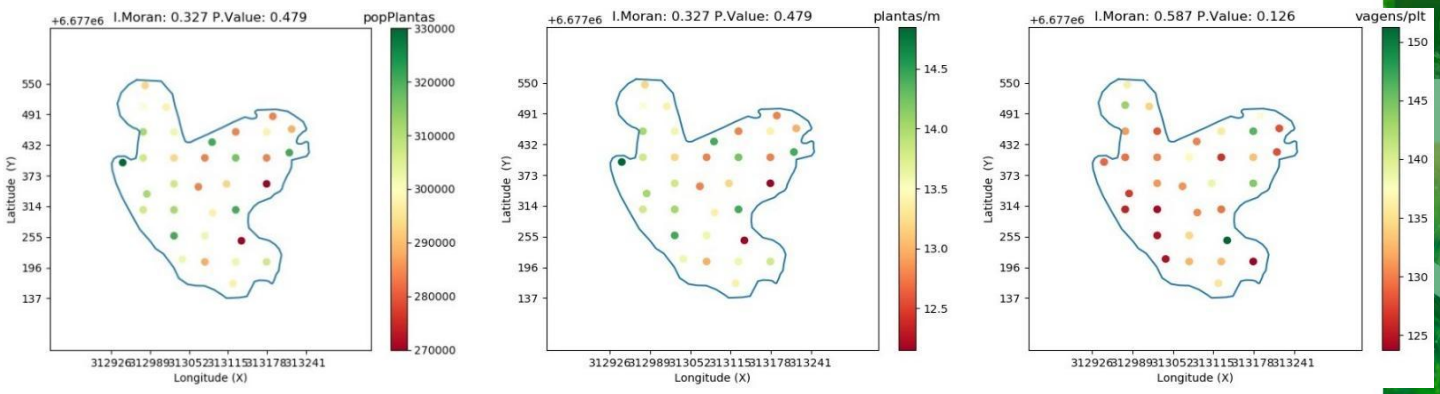
ISBN 978-65-990392-6-3

Dentre os fatores, podem ser citados o teor e a disponibilidade de nutrientes no solo, a acidez do solo e a disponibilidade de água. Também podemos considerar o fato de a área ser de primeiro cultivo e ainda estar sob processo de correção do solo.

Variações nos valores da condutividade elétrica aparente do solo são decorrentes de variações dos atributos químicos e físicos que constituem o solo. A CE20 depende do teor de água, da composição química da solução do solo e dos íons trocáveis, da porcentagem de argila no solo e da interação entre os íons não trocáveis e os trocáveis (Nadler; Frenkel, 1980). Robert et al. (1999) demonstraram que a condutividade elétrica é influenciada pelo teor de água, de sais, e pelo material de origem do solo. De acordo com Corwin; Lesch (2003), este comportamento se deve ao fato de a CE ser uma função da capacidade do solo em conduzir corrente elétrica através da solução do solo, partículas sólidas e cátions trocáveis presentes na superfície dos argilominerais. Trabalho conduzido por Sanches et al. (2018) demonstrou a utilização da CE como variável preditiva e descritiva para o pH do solo, evidenciando a relação entre pH e CE.

Na Figura 4 são apresentados os mapas ilustrativos da autocorrelação espacial e o resultado da estatística do Índice de Moran para população de plantas (Fig. 4a), plantas por metro (Fig. 4b) e vagens por planta (Fig. 4c). O resultado da estatística do Índice de Moran univariado indicou que estas variáveis não apresentaram autocorrelação espacial significativa (P.Value>0,05), portanto, não há indicativo de variabilidade espacial na área de estudo.

Figura 6 – Mapas referentes ao índice de Moran univariado, ilustrativo da autocorrelação espacial da população de plantas (a), plantas por metro (b) e vagens por planta (c). Cachoeira do Sul, 2023



(a) (b) (c)

Fonte: Autores.

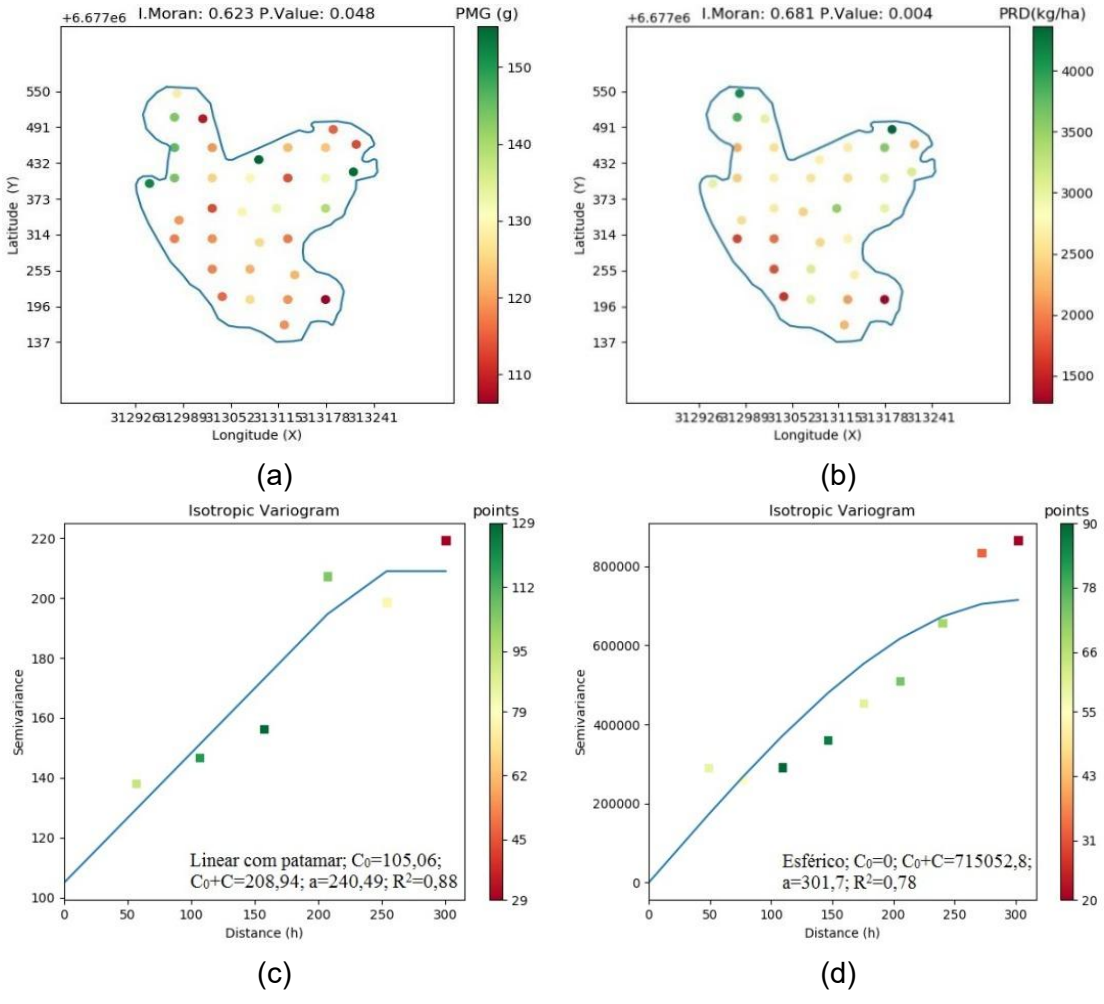
Segundo Almeida (2012), o índice de Moran univariado é uma medida estatística utilizada para avaliar a autocorrelação espacial em um conjunto de dados univariados. O resultado do índice de Moran univariado varia de -1 a 1. Um valor próximo de 1 indica autocorrelação espacial positiva, o que significa que áreas com valores altos tendem a estar cercadas por áreas com valores altos, e áreas com valores baixos estão cercadas por áreas com valores baixos. Um valor próximo de -1 indica autocorrelação espacial negativa, onde áreas com valores altos estão cercadas por áreas com valores baixos e vice-versa. Um valor próximo de zero indica ausência de autocorrelação espacial.

De acordo com Ferreira; Patino (2015), o valor p é definido como a probabilidade de se observar um valor da estatística de teste maior ou igual ao encontrado. Tradicionalmente, o valor de corte para rejeitar a hipótese nula é de 0,05, o que significa que, quando não há nenhuma diferença, um valor tão extremo para a estatística de teste é esperado em menos de 5% das vezes. Se o valor p de Moran for menor do que o nível de significância escolhido, é um

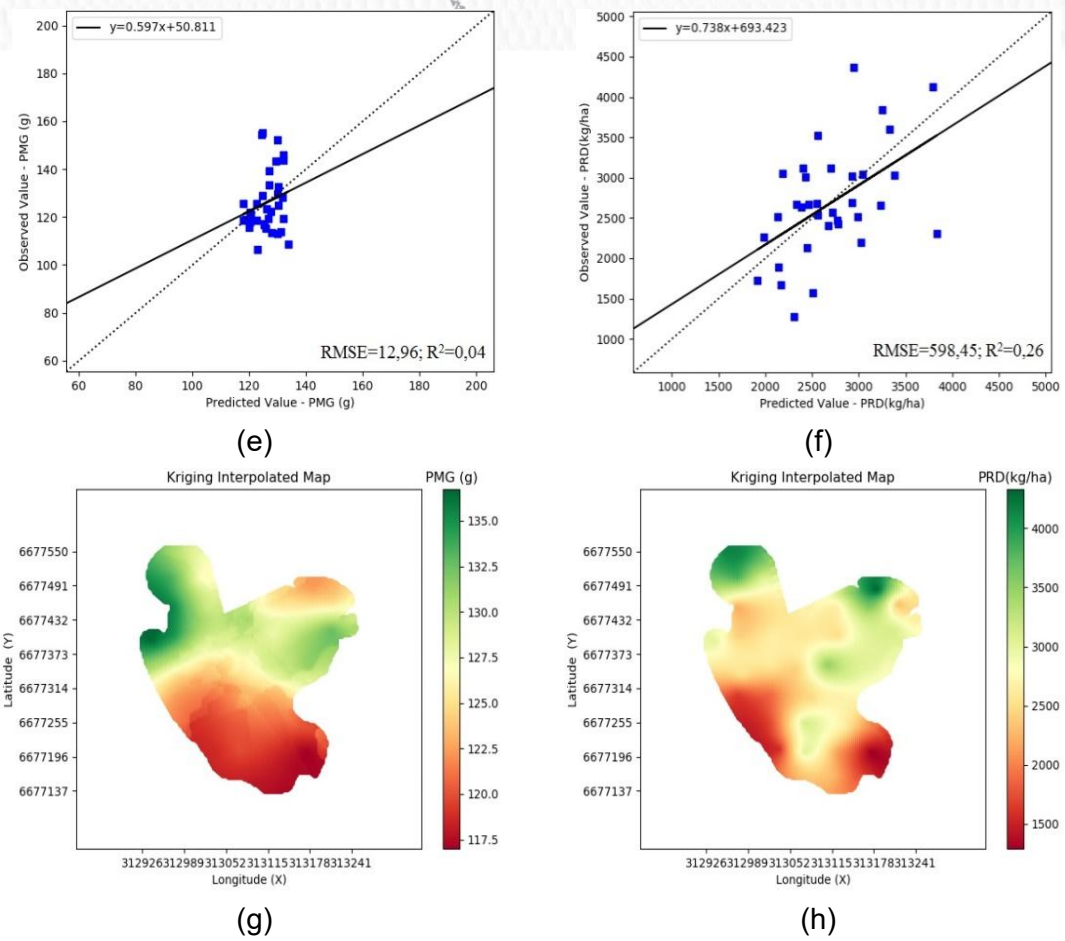
indicativo de existência de autocorrelação espacial significativa nos dados, rejeitando a hipótese nula. Por outro lado, se o valor p for maior do que o nível de significância, não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula, sugerindo que a distribuição espacial dos dados é aleatória. É importante destacar que o valor p de Moran não fornece informações sobre a direção ou o tipo de autocorrelação espacial presente nos dados (positiva ou negativa). Ele apenas indica se há ou não autocorrelação espacial significativa em relação à aleatoriedade espacial.

Na Figura 5 são apresentados os mapas referentes ao índice de Moran univariado, ilustrativo da autocorrelação espacial do peso de mil grãos (PMG, Fig. 5a) e da produtividade de soja (PRD, Fig. 5b), semivariogramas ajustados para peso de mil grãos (Fig. 5c) e para a produtividade de soja (Fig. 5d), gráficos de validação cruzada para peso de mil grãos (Fig. 5e) e para a produtividade de soja (Fig. 5f) e mapas temáticos de variabilidade espacial do peso de mil grãos (Fig. 6g) e produtividade de soja (Fig. 5h). O Índice de Moran univariado indicou haver autocorrelação espacial significativa para as variáveis peso de mil grãos e produtividade de soja, portanto, há indicativo de variabilidade espacial na área de estudo.

Figura 7 – Mapas referentes ao índice de Moran univariado, ilustrativo da autocorrelação espacial do (a) peso de mil grãos (PMG, g) e (b) produtividade de soja (PRD, Kg ha^{-1}), semivariogramas ajustados para peso de mil grãos (c) e produtividade de soja (d), gráficos de validação cruzada para peso de mil grãos (e) e produtividade de soja (f) e mapas temáticos de variabilidade espacial do peso de mil grãos (g) e produtividade de soja (h). Cachoeira do Sul, 2023



ISBN 978-65-990392-6-3



Fonte: Autores.

Os modelos teóricos de semivariância, ajustados a variância empírica dos dados de PMG e PRD, foram o modelo linear com patamar e o modelo esférico, respectivamente. O modelo linear com patamar assume que a semivariância aumenta linearmente até atingir um patamar, a partir do qual não há mais variabilidade entre as observações. Já o modelo esférico assume que a semivariância aumenta inicialmente, atinge um patamar e depois diminui gradualmente até se estabilizar em um valor próximo de zero. Essa forma de modelo é adequada quando a dependência espacial diminui com a distância, atingindo a independência espacial em uma determinada distância conhecida como alcance (ISAAKS; CRESSIE, 1989,1993).

Bottega et al. (2017), estudando a variabilidade espacial e temporal da produtividade da soja no cerrado brasileiro, observaram, para ajuste do semivariograma da variabilidade espacial, em duas safras agrícolas, o modelo esférico, corroborando com o presente estudo. Mondo et al. (2012) avaliou a variabilidade espacial da fertilidade do solo e sua relação com o potencial fisiológico de sementes em área de produção de soja. O ajuste do semivariograma foi usado como uma abordagem para modelar a variabilidade espacial dos parâmetros estudados. Os resultados do estudo mostraram que para a maioria dos nutrientes do solo estudados, o modelo de semivariograma escolhido foi o modelo esférico. Segundo os autores, o ajuste do semivariograma permitiu identificar e modelar padrões de autocorrelação espacial, fornecendo informações sobre a estrutura espacial da variabilidade dos parâmetros estudados.

O valor do alcance obtido para os modelos ajustados foi de 240,49 metros para o PMG e 301,7 metros para a PRD. Estes valores são superiores a menor distância entre pontos amostrais, que foi de 50 metros. Segundo CORÁ et al. (2004), o valor do alcance determina o número de valores usados na interpolação, portanto, podem influenciar na qualidade das

ISBN 978-65-990392-6-3

estimativas. Desta forma, estimativas feitas com interpolação por krigagem ordinária utilizando valores de alcances maiores tendem a ser mais confiáveis, apresentando mapas que representem melhor a realidade.

Os modelos teóricos de semivariância ajustados a variância empírica dos dados apresentaram R^2 de 0,88 (PMG) e 0,78 (PRD), considerados satisfatórios para a modelagem da dependência espacial. Segundo Witten et al. (2013), O R^2 em semivariogramas é calculado comparando-se a variação observada nos dados com a variação explicada pelo modelo de semivariograma. Quanto mais próximo o valor de R^2 estiver de 1, melhor o ajuste do modelo aos dados. Isso indica que a estrutura de dependência espacial capturada pelo modelo é altamente consistente com os dados observados.

Embora os valores de alcance tenham sido superiores a quatro vezes a distância entre pontos amostrais, a validação cruzada indicou erro de predição nos locais não amostrados de 12,96 g para o PMG e de 598,45 kg ha^{-1} para a PRD, valores estes, representativos de 10,28 e 22,28%, respectivamente, em relação ao valor médio mensurado para o PMG e PRD. O RMSE é calculado pela raiz quadrada da média dos erros ao quadrado, onde o erro é a diferença entre a previsão do modelo e o valor real. O RMSE fornece uma medida da magnitude média dos erros de previsão em relação às unidades da variável de interesse. Quanto menor o valor do RMSE, melhor é o desempenho preditivo do modelo (WITTEN et al., 2013). Este erro pode estar associado à elevada variabilidade espacial das variáveis estudadas, o que necessitaria de um maior número de pontos de coleta para uma predição de valores mais assertiva.

Os mapas temáticos representativos da variabilidade espacial do PMG e da PRD indicaram locais onde os valores altos e valores baixos são similares geograficamente. Este fato pode ser explicado dada a relação do PMG com a PRD. Estudos conduzidos por Melo et al., (2015) demostraram estreita relação existente entre a produtividade de grãos e o peso de mil sementes. De acordo com os autores, geralmente este componente o que mais explica a produtividade.

Neste estudo, locais onde o PMG foi baixo em relação à média, mas os valores de PRD apresentaram-se altos, podem ser explicados por dois fatores: número de vagens por planta e número de plantas por metro. Embora não tenha sido possível modelar a variabilidade espacial destas variáveis, elas influenciam de forma direta na produtividade da soja, pois, fazem parte dos componentes de rendimento da cultura (NAVARRO JUNIOR; COSTA, 2002).

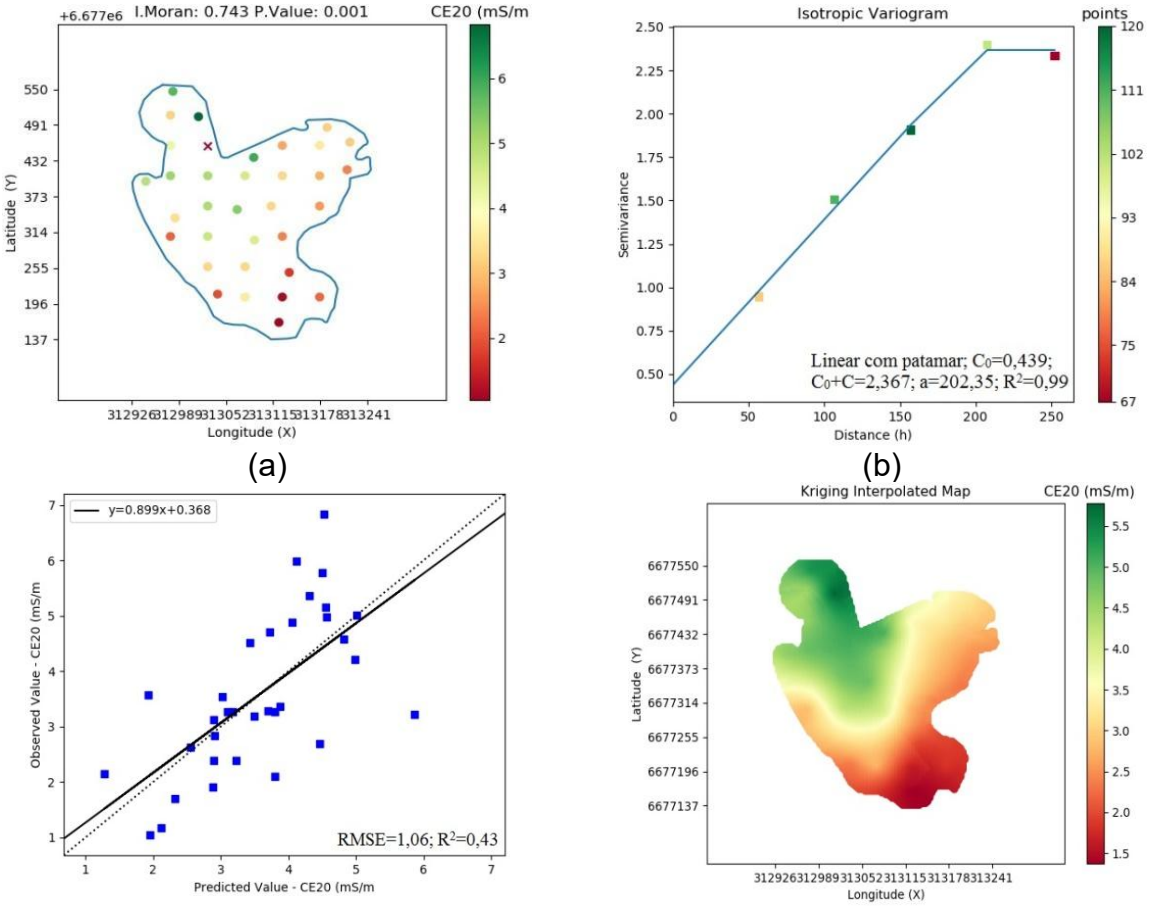
Na Figura 6 são apresentados os mapas referentes ao índice de Moran, ilustrativo da autocorrelação espacial da condutividade elétrica aparente do solo 0-20 cm (CE20, Fig. 6a), semivariograma ajustado (Fig. 6b), gráfico de validação cruzada (Fig. 6c) e mapa temático da variabilidade espacial (Fig. 6d). O índice de Moran univariado foi de 0,743 com pseudo p-valor de 0,001, indicando que a CE20 apresentou autocorrelação espacial significativa e, portanto, variabilidade espacial na área de estudo.

O modelo ajustado ao semivariograma foi o linear com patamar, com alcance de 202,35 metros e R^2 de 0,99. A validação apresentou Raiz do Erro Quadrático Médio de 1,06 mS m^{-1} para predição de valores em locais não amostrados. Foi observado, no mapa temático representativo da variabilidade espacial da CE20 que as regiões de maiores e menores valores, são similares aquelas de maiores e menores valores observadas para o PMG e a PRD.

A CE20 é resultado das características químicas, físicas e biológicas do solo, bem como da interação entre elas. Estas características do solo influenciam de forma direta no desenvolvimento das plantas e, consequentemente, na produtividade das mesmas. A real condutividade elétrica do solo depende do teor de água, da composição química da solução do solo e dos íons trocáveis, da porcentagem de argila no solo e da interação entre os íons não trocáveis e os trocáveis (NADLER; FREKEL, 1980).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 8 – Mapas referentes ao índice de Moran, ilustrativo da autocorrelação espacial da condutividade elétrica aparente do solo 0-20 cm (a), semivariograma ajustado (b), gráfico de validação cruzada (c) e mapa temático da variabilidade espacial (d). Cachoeira do Sul, 2023



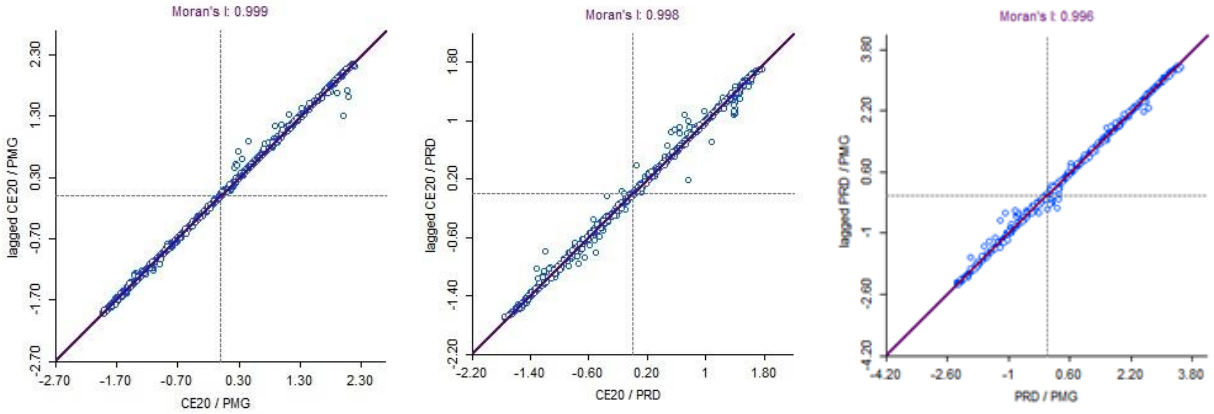
Fonte: Autores.

Na Figura 7 são apresentados gráficos de dispersão de Moran bivariado local para condutividade elétrica aparente do solo (CE20) com o peso de mil grãos (PMG, Fig. 7a) e com a produtividade de soja (PRD, Fig. 7b) e para produtividade de soja e peso de mil grãos (Fig. 7c).

De acordo com Diniz (2012), além da medida global de associação linear espacial, o diagrama dispersão mostra associação espacial entre as regiões e seus vizinhos dividido em quatro quadrantes: alto-alto (AA), baixo-baixo (BB), alto-baixo (AB) e baixo-alto (BA). Quando o I de Moran é positivo a reta de regressão apresenta inclinação ascendente e os dados tendem a estar agrupado no primeiro e terceiro quadrante, porém quando o I de Moran é negativo a reta de regressão é descendente e dados aparecem localizados em sua grande maioria no segundo e quarto quadrante. Foram observados, neste estudo, valores positivos do índice de Moran, muito próximos ao valor 1. A inclinação da reta foi ascendente, indicando haver correlação positiva entre as variáveis estudadas de modo a se ter autocorrelação espacial. Estes resultados corroboram com estudos conduzidos por Perobelli et al., (2007) e Vidigal et al., (2018).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 9 – Gráficos de dispersão de Moran bivariado local para condutividade elétrica aparente do solo (CE20) com: (a) peso de mil grãos (PMG) e (b) produtividade de soja (PRD) e para produtividade de soja e peso de mil grãos (c). Cachoeira do Sul, 2023

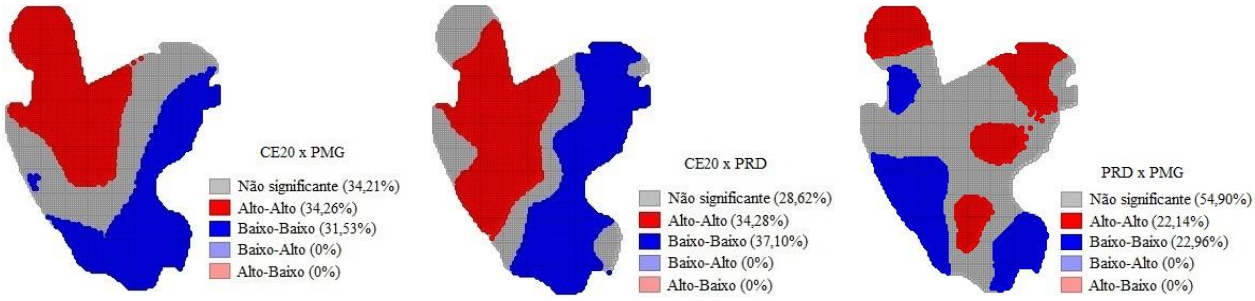


(a) (b) (c)

Fonte: Autor.

Na Figura 9 são apresentados os mapas de agrupamento do índice de Moran bivariado local (pseudo p-valor < 0,05 com 999 permutações) para condutividade elétrica aparente do solo (CE20) com o peso de mil grãos (PMG, Fig. 8a) e produtividade de soja (PRD, Fig. 8b) e para produtividade de soja e peso de mil grãos (Fig. 8c). Nos mapas de agrupamento confeccionados, das cinco regiões distintas: Não significante; Alto-Alto; Baixo-Baixo; Baixo-Alto e Alto-Baixo. Neste estudo, o agrupamento dos dados resultou em três delas: Não significante; Alto-Alto e Baixo-Baixo.

Figura 10 – Mapas de agrupamento do índice de Moran bivariado local (pseudo p-valor < 0,05 com 999 permutações) para condutividade elétrica aparente do solo (CE20) com: (a) peso de mil grãos (PMG) e (b) produtividade de soja (PRD) e para produtividade de soja e peso de mil grãos (c). Cachoeira do Sul, 2023



(a) (b) (c)

Fonte: Autor.

Um agrupamento Alto-Alto (AA) significa que as unidades espaciais pertencentes a esse agrupamento exibem valores altos da variável de interesse rodeados por unidades espaciais que apresentam valores também altos, representado pelo primeiro quadrante do diagrama. Um agrupamento baixo-baixo (BB) refere-se a um agrupamento cujas unidades espaciais mostram valores baixos circundados por unidades espaciais que ostentam valores também baixos, representado pelo terceiro quadrante. Valores não significativos (na cor cinza) indicam que o valor da variável na região *i* está próxima da média e, portanto, não são consideradas alto ou baixo.

ISBN 978-65-990392-6-3

Estudando a variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente e das propriedades do solo em área de produção de café, Valente et al. (2014) observaram que a localização geográfica dos agrupamentos AA, fora similar aos locais onde observaram os maiores valores de CE20 e dos atributos químicos do solo: potássio, fósforo remanescente, manganês, fósforo, zinco, cobre e cálcio. Já os locais com agrupamentos BB, coincidiram com locais de menores valores de CE20, capacidade de troca de cátions, silte, soma de bases, além dos atributos químicos citados anteriormente. No presente estudo, embora não se tenha realizado análise de solo nos locais de mensuração da CE20 e de coleta das plantas para quantificação dos componentes de rendimento e da produtividade da soja, pode-se inferir que os agrupamentos AA e BB, observados para análise entre CE20 x PMG e CE20 x PRD foram influenciados de forma direta pela variabilidade espacial dos atributos do solo, haja visto a influência destes sobre a CE20, PMG e PRD, conforme já discutido anteriormente. Estes mapas de agrupamento poderiam ser utilizados como base na delimitação de zonas de manejo, visando a caracterização localizada do solo, via coleta e análise laboratorial.

4 CONCLUSÃO

Na área de estudo, as variáveis população de plantas, plantas por metro e vagens por planta não exibiram variabilidade espacial, ao passo que foi possível mapear a variabilidade espacial do peso de mil grãos e da produtividade de soja, descritas pelos modelos teóricos de semivariância linear com patamar e esférico, respectivamente. A condutividade elétrica aparente do solo também apresentou variabilidade espacial, ajustada ao modelo linear com patamar. Observou-se forte correlação espacial entre a condutividade elétrica aparente do solo e tanto o peso de mil grãos quanto a produtividade de soja, assim como entre o peso de mil grãos e a produtividade. O agrupamento do tipo Alto-Alto predominou entre a condutividade elétrica aparente do solo e o peso de mil grãos, sendo significativo em 34,26% da área, enquanto o agrupamento Baixo-Baixo foi prevalente entre a condutividade elétrica aparente do solo e a produtividade de soja, significativo em 37,10% da área. Para as variáveis peso de mil grãos e produtividade, o agrupamento não significativo ocorreu em 54,90% da área, apesar da forte correlação espacial observada. Os mapas de agrupamento do índice de Moran bivariado local podem ser empregados na delimitação de zonas de manejo, orientando, por exemplo, a coleta direcionada de amostras de solo para análises laboratoriais e caracterização da fertilidade.

REFERÊNCIAS

AGRO BAYER. **Sementes de soja AS 3615 I2X**. Disponível em: https://www.agro.bayer.com.br/d/soja-agroeste-as-3615-i2x-br. Acesso em: 25 abr. 2023.

ALMEIDA, E. **Econometria Espacial Aplicada**, p. 428. Editora Alínea, 2012.

ANSELIN, L.; SYABRI, I. SMIRNOV, O. **Visualizing multivariate spatial correlation with dynamically linked windows**. University Illinois, 2003 (mimeo).

ANSELIN, L.; SYABRI, I.; KHO, Y. GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis. **Geographical Analysis**, v. 38, n. 1, p. 5–22, 2005.

BOTTEGA, E.L.; QUEIROZ, D.M.; PINTO, F.A.C.; VALENTE, D.S.M.; SOUZA, C.M.A. Precision agriculture applied to soybean: Part III - spatial and temporal variability of yield. **Australian Journal of Crop Science**, v.11, n.7, p.799–805, 2017.

BOTTEGA, E.L.; SAFANELLI, J.L.; ZERAATPISHEH, M.; AMADO, T.J.C.; QUEIROZ, D.M. de; OLIVEIRA, Z.B. de. Site-Specific management zones delineation based on apparent soil electrical conductivity in two contrasting fields of Southern Brazil. **Agronomy**, v.12, p.1390. 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy12061390

CORWIN, D.L.; HENDRICKX, J.M.H. **Electrical Resistivity: Wenner Array**. In: SILVA, J.S. Methods of Soil Analysis Part 4 Physical Methods, Madison, Wisconsin, USA: SSSA Book Series, n. 5, p.1282-1287, 2002.

CORWIN, D.L.; LESCH, S.M. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture: Theory, Principles, and Guidelines. **Agronomy Journal**, v.95, n. 3, p. 455-471, 2003.

CORÁ, J. E. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, 2004.

CRESSIE, N.A.C. (1993). **Statistics for Spatial Data**. Wiley.

DINIZ, S. S. **Análise espacial da produtividade da Laranja dos municípios do estado de São Paulo: 2002 a 2010.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Londrina, 2012, 118 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 3.ed. Brasília, 2013. 353p.

FERREIRA, C. F.; PATINO, C. M. O que realmente significa o valor-p? **Jornal Brasileiro de Pneumologia**. 2015 p. 485-485.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. (1989). **An Introduction to Applied Geostatistics**. Oxford University Press. 1989.

JOHNSON, C.; ESKRIDGE, K., CORWIN, D. Apparent soil electrical conductivity: applications for designing and evaluating field-scale experiments. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, p. 181-202, 2005.

KUSS, R. C. R. **Populações de plantas e estratégias de irrigação na cultura da soja.** Dissertação de Mestrado/Universidade Federal de Santa Maria – Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo. Santa Maria – RS, 2006.

ISBN 978-65-990392-6-3

MONDO V. H. V. et al. Variabilidade espacial da fertilidade do solo e sua relação com o potencial fisiológico de sementes em área de produção de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 34, n. 2, p. 193-201, 2012.

MELO et al. Produtividade de soja em função de diferentes épocas de dessecação no município de Lucas do Rio Verde-MT. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.11 n.21; p. 2015

NADLER, FRENKEL, H. Determination of Soil Solution Electrical Conductivity from Bulk Soil Electrical Conductivity Measurements by the Four-Electrode Method 1. **Journal of Chromatography B**, v. 44, n. 2, p. 1216–1221, 1980.

NAVARRO, H. M. J.; COSTA, J. A. Contribuição relativa dos componentes do rendimento para produção de grãos em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 3, p. 269-274, mar. 2002.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). Disponível em: http://www.fao.org/home/en/. Acesso em 5 de jul. de 2023.

OLIVER, M.A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, v.113, p.56-69, 2014.

PEREIRA, G.W.; VALENTE, D.S.M.; QUEIROZ, D.M.d.; COELHO, A.L.d.F.; COSTA, M.M.; GRIFT, T. Smart-Map: An open-source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging. **Agronomy**, v.12, n.6: 1350, 2022.

PEROBELLI, F.S., ALMEIDA, E.S., ALVIM, M.I.S., FERREIRA, P.G.C. A. Análise espacial da produtividade do setor agrícola brasileiro: 1991-2003. **Nova Economia**, v.17, n.1, p. 65-91, 2007. DOI: 10.1590/S0103-63512007000100003.

QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2020. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: http://qgis.osgeo.org. Acesso em 1 de jul. de 2023.

ROBERT, P. C. et al. **Field Comparison of Two Soil Electrical Conductivity Measurement Systems. In: Precision Agriculture.** [s.l.] American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1999. v. acsesspublp. 1211–1217.

SANCHES G.M.; MAGALHÃES P.S.G.; REMACRE A.Z.; FRANCO H.C.J. Potential of apparent soil electrical conductivity to describe the soil pH and improve lime application in a clayey soil. **Soil and Tillage Research,** 175, p. 217-225, 2018.

VALENTE et al. Variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente e das propriedades do solo em área de produção de café. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.34, n.6, p. 1224-1233, nov./dez. 2014.

VIDIGAL et al. Distribuição espacial da produtividade da soja no Rio Grande do Sul: um estudo exploratório. **Acta Scientiarum**. Human and Social Sciences, v. 40, n. 2, e33652, 2018.

WITTEN, D., JAMES, G., HASTIE, T., TIBSHIRANI, R. **An Introduction to Statistical Learning: With Applications in R. Springer.** 2013.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 50

ANÁLISE DA DENSIDADE DE GOTAS POR PULVERIZAÇÃO AÉREA COM AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA EM VIDEIRA

Droplet density analysis by aerial spraying with remotely piloted aircraft in vineyard

Lillian Espindola Müller[1], Christian Bredemeier[2], Fabio Rossi Cavalcanti[3], Ana Julia Teixeira Soares[4], Bárbara da Silva Nogueira[4], Teresa Enderle[4], Márcio Andrei Fusiger[5], Gabriel Mateus Maggioni[5]

[1] PPG em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 7712, 91540-000, Porto Alegre – RS, Brasil, lillianespindola.fito@gmail.com
[2] Depto. de Plantas de Lavoura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 7712, 91540-000, Porto Alegre – RS, Brasil, bredemeier@ufrgs.br
[3] Embrapa Uva e Vinho, Rua Livramento, 515, 95701-008, Bento Gonçalves – RS, Brasil, fabio.cavalcanti@embrapa.br
[4] Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 7712, 91540-000, Porto Alegre – RS, Brasil, anajuliatex3@gmail.com, barbara.nogueira012@gmail.com, terenderle@gmail.com
[5] Texag Sul, Distrito Santana, 99530-000, Chapada – RS, Brasil, marcioafusiger@hotmail.com, gabriel.texag@gmail.com

RESUMO

Este trabalho avaliou a densidade de gotas de pulverização aérea nos terços superior, médio e inferior de videiras conduzidas em espaldeira, utilizando uma aeronave remotamente pilotada. O experimento comparou diferentes alturas de voo e taxas de aplicação. O tratamento T3 (5 m de altura e 80 L/ha) foi o mais eficaz, proporcionando a maior densidade de gotas em todos os terços do dossel, atendendo aos requisitos para o controle de doenças fúngicas. O tratamento T1 (5 m e 20 L/ha) foi considerado inadequado, pois não produziu resultados satisfatórios. O estudo concluiu que a combinação de 5 m de altura de voo com 80 L/ha de taxa de aplicação é a mais eficaz para garantir uma densidade de gotas adequada em toda a estrutura da videira, demonstrando que a distância da fonte e a taxa de aplicação são parâmetros-chave para a distribuição.

Palavras-chave: Densidade de gotas. Drone agrícola. Videira.

ABSTRACT

This study evaluated the droplet density of aerial spraying on the upper, middle and lower thirds of espalier-trained vines using a remotely piloted aircraft. The experiment compared different flight heights and application rates. Treatment T3 (5 m height and 80 L/ha) was the most effective, providing the highest droplet density across all thirds of the canopy, meeting the requirements for fungal disease control. Treatment T1 (5 m height and 20 L/ha) was considered inadequate, as it did not produce overwhelming results. The study concluded that the combination of 5 m flight height and 80 L/ha application rate is the most effective for ensuring adequate droplet density throughout the vine structure, demonstrating that distance from the source and application rate are key parameters for distribution.

Keywords: Droplet density. Agricultural drone. Vine.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de aeronaves agrícolas não tripuladas podem ser um método eficaz para a aplicação de produtos fitossanitários em pomares, especialmente em áreas montanhosas ou acidentadas onde as máquinas terrestres não conseguem operar, tornando significativa a melhora na eficiência da pulverização (LIU et al., 2020). A tecnologia de aplicação aérea com drones oferece diversas oportunidades para a agricultura moderna. Uma das principais é a redução do uso de defensivos agrícolas (HAFEEZ et al., 2023). Nas aplicações com equipamentos de pulverização terrestre é comum a obtenção de uma superpopulação de gotas que resulta em um molhamento expressivo levando ao tratamento excessivo e, portanto, ao desperdício de produtos, já nas aplicações aéreas por meio de drones se obtém uniformidade tanto na população quanto no diâmetro das gotas (MARTINEZ GUANTER et al., 2020).

Wang et al. (2021) avaliando a deposição de calda, à deriva e o balanço de massa de pulverização para veículos aéreos não tripulados utilizando um vinhedo artificial, concluíram que o método utilizado pode ser conduzido para mais variáveis como tipo de ponta de pulverização, tamanho de gota, carga, velocidade de voo, altura de voo e taxa de aplicação, sendo que os resultados obtidos forneceram referências para a seleção dos parâmetros de operação para a pulverização aérea com drones em vinhedos. Em estudo conduzido por Biglia et al. (2022) foram avaliados os modos de voo e efeitos de ajuste do sistema de pulverização no depósito do dossel, cobertura e perdas fora do alvo em vinhedos, verificando que o parâmetro que mais afetou a eficiência da aplicação foi o modo de voo sendo que o modo alinhado com a videira, tornou possível direcionar a pulverização para o dossel da cultura, maximizando assim a deposição e minimizando as perdas fora do alvo no solo.

O efeito “downwash” é caracterizado pelo fluxo de ar descendente gerado pelo rotor (ZHENG et al., 2018). Esse efeito exerce um impacto significativo na otimização da aplicação de produtos fitossanitários, minimizando os impactos ambientais e influenciando diversos aspectos, como a deposição das gotas no dossel, a redução da deriva, a uniformidade de distribuição e o direcionamento das gotas, além de afetar diretamente na largura da faixa de pulverização (SOUZA et al., 2022; CUNHA; SILVA, 2023). Zhang et al. (2020) observaram que o fluxo de ar em torno de um veículo aéreo multirotor muda com a velocidade de voo (7,2 a 18,0 km/h). Apesar das diferenças na massa foliar da metade superior e inferior do dossel, Da Vitória et al. (2022) puderam inferir que o fluxo de ar gerado pelos rotores auxiliou na penetração das gotículas, porém quanto mais próximo da copa da planta pior a eficiência da pulverização pois nessas condições a intensidade do fluxo de ar prejudica a deposição de gotas na metade superior. Segundo Do Nascimento et al. (2022) pode-se inferir que gotas menores podem facilmente penetrar no dossel e se depositar nas áreas mais internas, enquanto gotas maiores são depositadas nas camadas superior e externa das folhas.

Quanto a velocidade de voo, Biglia et al. (2022) verificaram que o uso de uma velocidade de 3 m/s em vinhedos permitiu aumentar a deposição de gotas no dossel e reduzir as perdas de pulverização, especialmente quando pontas de pulverização convencionais foram utilizadas. Enquanto que em trabalho realizado por Byers (2023) a fim de caracterizar o desempenho de pulverização de um drone DJI Agras T30 foi observado que a cobertura de pulverização foi semelhante para as velocidades mais baixas analisadas (4,5 e 5,6 m/s), no entanto para a velocidade de aplicação recomendada pelo fabricante (6,7 m/s) a cobertura foi reduzida.

A uniformidade na distribuição das gotas, a redução da passagem de calda fitossanitária para o solo e a redução do impacto ambiental devido à deriva e ao uso excessivo de produtos ainda são grandes desafios para a pulverização agrícola (BIGLIA et al., 2022). Em estudo realizado por Liu et al. (2020) utilizando ultrabaixo volume em pomares de macieira foi

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

verificado que a deposição real foi menor do que a de um pulverizador convencional assistido por ar, mas a deposição normalizada foi equivalente, o que indica que os sistemas de aeronaves agrícolas não tripuladas multirotores podem ser utilizados para a aplicação fitossanitária em pomares.

Para aplicações terrestres em pomares utilizando uma taxa de aplicação de 500 a 7.000 L/ha, a densidade mínima de gotas para a deposição adequada no dossel é de 30 gotas/cm^2 (GRELLA et al., 2022). Martinez Guanter, et al. (2020) avaliando a pulverização e a economia de uma aplicação de ultrabaixo volume à base de um veículo aéreo não tripulado em olivais e pomares de frutas cítricas verificaram que um equipamento de aplicação terrestre, em uma configuração normal de trabalho e em condições de baixo vento, gera uma deriva grande o suficiente para ser um problema ambiental enquanto que o emprego de um veículo aéreo não tripulado reduziu significativamente a deriva, além de evitar os problemas de compactação do solo causados pelo maquinário terrestre.

Em estudos realizados foram observadas interações significativas dos parâmetros operacionais sobre a eficiência de aplicação e/ou eficácia dos produtos fitossanitários testados em pomares de citros, abacaxi, pera, pêssego, maçã, goiaba, manga e uva (RIBEIRO et al., 2023). Verma et al. (2022) avaliaram a viabilidade de pulverização utilizando um drone hexacóptero na aplicação de azadiractina (0,15% EC) para o controle de pulgões em pomares de goiabeira na Índia, operando a uma altura de voo de 2 m acima do topo do dossel e utilizando cartões hidrossensíveis fixados no lado externo e interno das goiabeiras, obtendo reduções percentuais na população de pulgões. Em análise realizada por Miranda et al. (2023) foi avaliada a aplicação de inseticida utilizando um veículo aéreo não tripulado, modelo P30 da fabricante XAG, equipado com sistema de pulverização por atomizadores rotativos, no controle de adultos de *Diaphorina citri* em pomares de citros, voando a 4 m de altura com velocidade de 6 m/s e utilizando faixas de 6 e 10 m. Como resultado obtiveram um controle maior que 80% na mortalidade do psilídio, independentemente da idade do pomar e da posição na copa das árvores, indicando a possibilidade de utilizar esse método como uma ferramenta adicional para o manejo de *D. citri*.

Uma maneira comumente utilizada para avaliar a eficácia da pulverização é através do uso de cartões hidrossensíveis. Estes cartões, que mudam de cor quando entram em contato com soluções aquosas, proporcionam informações qualitativas e quantitativas sobre a deposição de pulverização. No estudo de Nansen et al. (2015), os pesquisadores distribuíram cartões hidrossensíveis em campos de cultivo experimental e compararam diferentes tipos de pontas, pressões operacionais e volumes de pulverização. Os resultados mostraram uma variação significativa na deposição e cobertura, destacando a importância de selecionar e calibrar cuidadosamente o equipamento de aplicação aérea para eficiência e eficácia. No entanto, ao se avaliar o impacto de parâmetros operacionais na distribuição de gotas utilizando um veículo aéreo não tripulado em um pomar de mamão, Ribeiro et al. (2023) verificaram que independentemente da dose de aplicação e da ponta de pulverização utilizada, a distribuição de gotas ao longo das camadas e nos cachos de frutos de mamão foram uniformes, principalmente na camada foliar superior.

Em geral, as pontas não produzem um único diâmetro de gotas, resultando em um perfil não homogêneo conhecido como espectro de gotas (COSTA et al., 2019).

A taxa de aplicação ou volume de pulverização refere-se à quantidade aplicada por unidade de área e é expressa em litros por hectare (L/ha), (MATUO, 1990). Esse parâmetro desempenha um papel fundamental na distribuição eficaz do produto, sendo determinado em função do alvo a ser controlado, tipo e modo de ação do produto fitossanitário, condições meteorológicas, necessidade de cobertura e estágio de desenvolvimento da cultura (FREITAS et al., 2022). Guo et al. (2022) constataram a viabilidade da pulverização por drones agrícolas

ISBN 978-65-990392-6-3

em pomares de peras “Nanguo” verificando que o aumento da taxa de aplicação pode aumentar a quantidade de deposição de gotas sem alterar o tamanho da mesma. No cultivo de peras a direção de voo com rota paralela à linha da cultura utilizando taxa de aplicação de 90 L/ha, velocidade de voo de 1,5 m/s e altura de voo de 4,5 m produziu a maior densidade de gotas e cobertura de pulverização (QI et al. 2023). Já para o cultivo de pessegueiros, Meng et al. (2020) verificaram que o aumento na velocidade de voo de 2 a 5 m/s diminuiu significativamente a taxa de cobertura de gotas para ambos os formatos analisados (“Y” e líder central).

Buscando otimizar os parâmetros de controle de densidade de gotas em citrus, Hou et al. (2019) verificaram que o aumento na velocidade de voo de 1 m/s corresponde a diminuição na densidade de gotas de quase 6,72 gotas/cm^2 e que a altura ideal de pulverização para maximizar a densidade de gotas em citrus foi de 1,27 m. Com relação à altura de voo em seu trabalho, Da Vitória et al. (2022) encontraram diferença significativa entre as alturas de voo analisadas, concluindo que a altura de 3 m proporcionou maior uniformidade em relação à densidade de gotas, cobertura, deposição e diâmetro mediano volumétrico (DMV) para o do café conilon. Na cultura do citrus, Do Nascimento et al. (2022) mostraram que alturas de pulverização de 3 e 4 m apresentaram efeito notável na quantidade de deposição, mas sua influência no tamanho da gota foi insignificante.

A adequada deposição de gotas no dossel e o controle efetivo de doenças está diretamente relacionado a densidade de gotas obtidas na pulverização (CAVALCANTI e MULLER, 2023). Desta forma, o objetivo deste trabalho consiste em avaliar a densidade de gotas de pulverização aérea nos terços superior, médio e inferior de videiras conduzidas em espaldeira, visando otimizar a eficiência dos tratamentos fitossanitários.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O experimento foi realizado em vinhedo da variedade “Cabernet Suavignon” (*Vitis vinífera* L.), conduzido em sistema de espaldeira, com espaçamento de 3,0 m entre as fileiras e 2,0 m entre as plantas, disposto em orientação norte – sul, com inclinação entre 5 a 10°N, situado na Estação Experimental da Embrapa Uva e Vinho, localizada no município de Bento Gonçalves/RS a latitude de 29° 09' 52.5" S e longitude 51° 32' 03.1" W, com 690 metros de altitude. O município de Bento Gonçalves está situado na região fisiográfica da Encosta Superior do Nordeste, localizada na Bacia do rio Taquari-Antas e na Bacia do rio Caí, no Rio Grande do Sul (RS). De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima é do tipo Cfb (temperado úmido, sem estação seca definida e com temperatura média do mês mais quente inferior a 22ºC), não há estação seca definida, todos os meses apresentam precipitação pluvial mensal acima de 60 mm, com variação entre 126 mm e 181 mm. A temperatura média anual é 17,6°C, sendo julho e janeiro os meses com menor e maior média mensal, respectivamente. A temperatura média do mês mais quente (janeiro) é 22,0°C, sendo esse o limite entre os climas Cfb e Cfa. (JUNGES; TONIETTO, 2022). Com relevo ondulado a forte ondulado e desenvolvidos a partir de rochas efusivas ácidas (riolito, dacito) ocorrem Argissolos Bruno-Acinzentados Alíticos abrúpticos, segundo Streck et al. (2018), mas também existem áreas em que as unidades de mapeamento de solos são complexos de solos, pois em uma faixa de poucos metros podem existir dois ou três tipos de solos diferentes (VALLADARES et al., 2005).

Para a execução do experimento foi adotado um delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial, aplicando-se bordaduras de 10 x 20 m ao redor das parcelas e

ISBN 978-65-990392-6-3

excluindo-se as plantas das linhas externas como forma de controle do erro experimental. Nas avaliações foi utilizado um drone agrícola modelo P100PRO da fabricante XAG, com capacidade de tanque de 50 L, equipado com dois atomizadores rotativos. Seis ensaios de pulverização foram conduzidos no período de maturação da cultivar C. Suavignon, de acordo com a categorização de Mandelli et al. (2003), durante a safra 2024/2025. Os ensaios consistiram em duas alturas de voo (3 m e 5 m) e três taxas de aplicação (20 L/ha, 50L/ha e 80 L/ha), utilizando-se água como simulador de calda, avaliando-se a deposição de gotas nos terços superior, médio e inferior da videira. Foram adotados os parâmetros operacionais de largura de faixa igual a seis metros e velocidade de voo de 2,7 m/s. As aplicações foram realizadas de acordo com as condições climáticas adequadas para a pulverização aérea (ANDEF, 2004). Os tratamentos avaliados foram: T1 – 5 m e 20 L/ha, T2 – 5 m e 50 L/ha, T3 – 5 m e 80 L/ha, T4 – 3 m e 20 L/ha, T5 – 3 m e 50 L/ha, T6 – 3 m e 80 L/ha. Os voos foram traçados, alinhados ao sentido de condução das linhas das videiras.

2.2 COLETA, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Para a coleta de gotas e posterior análise de deposição foram utilizados cartões hidrossensíveis, medindo 26 x 76 mm, posicionados no terço superior, terço médio e terço inferior da videira. Em cada parcela foram utilizados nove cartões para cada terço da cultura, que representaram as repetições para cada tratamento. Após a pulverização e consequente secagem das gotas nos cartões hidrossensíveis, estes foram coletados, acondicionados em papel alumínio e devidamente identificados para posterior digitalização e análise.

Os dados foram processados e analisados através do Dropscope, que é um microscópio digital capaz de realizar a leitura das gotas depositadas em papéis hidrossensíveis, promovendo um diagnóstico da qualidade da aplicação. A densidade de gotas é um indicador que fornece informações de quantas gotas atingiram uma área equivalente a um centímetro quadrado, sendo um parâmetro internacionalmente indicado para a calibração da deposição. Os dados obtidos foram submetidos a análise estatística através do software R v.4.5.1., utilizando-se o método não paramétrico de Kruskal-Wallis, com 5% de nível de significância.

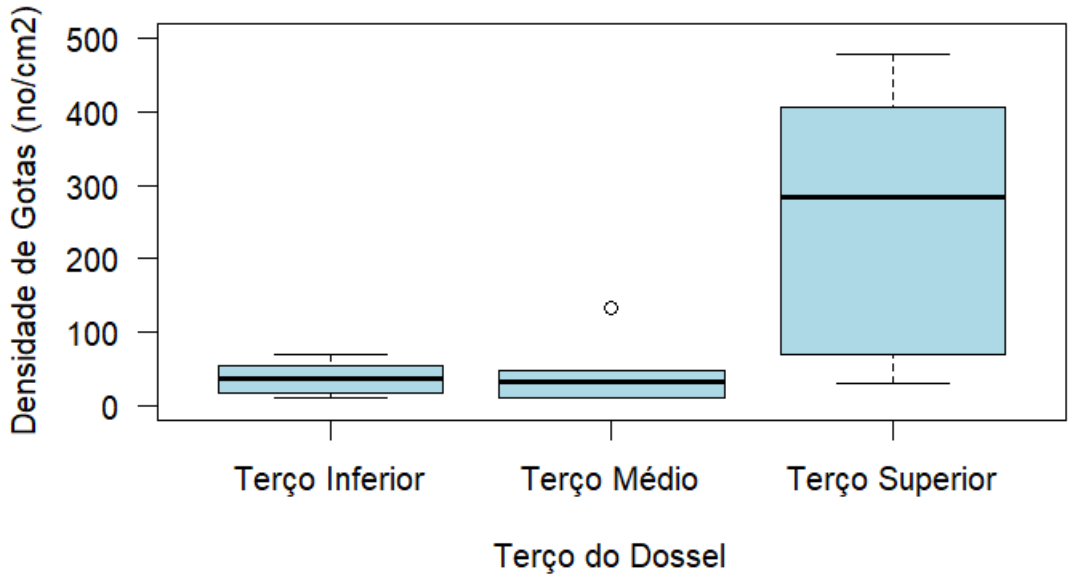
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 TERÇO DO DOSSEL

Quando analisado os diferentes terços do dossel pode-se observar uma clara tendência de aumento na densidade de gotas na camada superior (Figura 1). O terço inferior apresentou uma mediana de aproximadamente 40 gotas/cm² e uma baixa dispersão, sugerindo pouca variabilidade nessa camada do dossel. O terço médio mostrou uma densidade de gotas similar ao terço inferior, com uma mediana na casa dos 40-50 gotas/cm², mas com a presença de um “outlier” indicando um valor atípico de cerca de 150 gotas/cm², o que pode significar acúmulo de gotas em alguns pontos. Em contraste, o terço superior demonstrou uma densidade de gotas substancialmente maior, com uma mediana próxima a 300 gotas/cm² e uma amplitude interquartil (IQR) consideravelmente mais ampla, sugerindo uma maior variabilidade e acúmulo de gotas nessa região do dossel.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 1 – Box plots para a densidade de gotas nos terços do dossel.

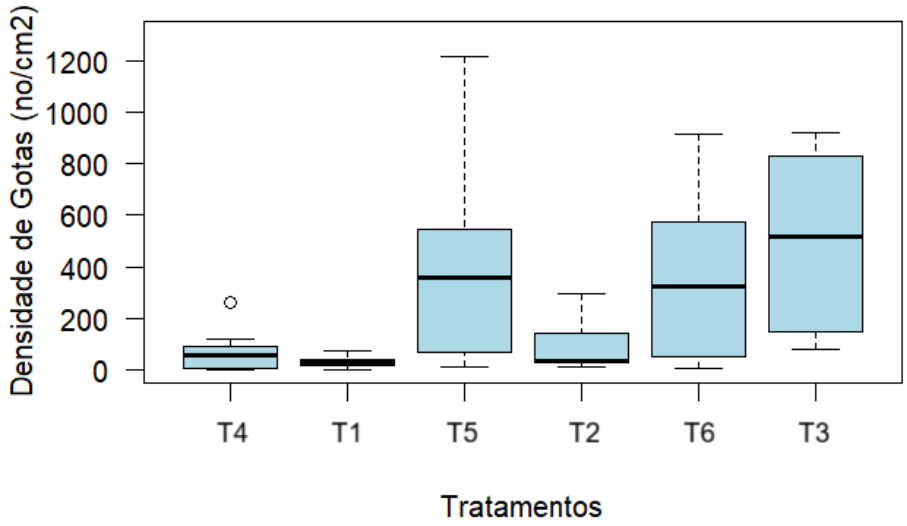


Fonte: Müller et al. (2025)

3.1.1 TERÇO SUPERIOR

A distribuição dos dados para densidade de gotas pode ser visualizada utilizando box plots ou diagrama de caixas (Figura 2). Observou-se dados de mediana significativamente maiores para os tratamentos T3, T5 e T6 em comparação com os tratamentos T1, T2 e T4. A dispersão dos dados, medida pelo intervalo interquartílico (IQR), também foi mais expressiva nos tratamentos T3, T5 e T6, sugerindo maior variabilidade nas respostas à altura de voo e taxa de aplicação.

Figura 2 – Box plots para a densidade de gotas no terço superior do dossel.



Legenda: T1 (5 m e 20 L/ha), T2 (5 m e 50 L/ha), T3 (5 m e 80 L/ha), T4 (3 m e 20 L/ha), T5 (3 m e 50 L/ha) e T6 (3 m e 80 L/ha).
Fonte: Müller et al. (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

A análise de variância (ANOVA) não indicou interação significativa entre os fatores sugerindo a aplicação de teste não paramétrico para análise. Aplicado o teste de Kruskal-Wallis obteve-se valor de p significativo, evidenciando diferenças relevantes entre os tratamentos (Tabela 1). O teste de comparação múltipla de LSD demonstrou que o tratamento T3 (5 m e 80 L/ha) apresentou a maior média (479,25), sendo estatisticamente superior aos tratamentos T1 (5 m e 20 L/ha) e T4 (3 m e 20 L/ha), que foram agrupados em "b". Os tratamentos T2 (5 m e 50 L/ha), T5 (3 m e 50 L/ha) e T6 (3 m e 80 L/ha) não diferiram estatisticamente do tratamento T3 ou dos tratamentos T1 e T4, indicando um comportamento intermediário ou sobreposição de grupos.

Tabela 1. Análise de Variância (Kruskal-Wallis) e Comparação Múltipla (LSD) para a densidade de gotas no terço superior do dossel.

Variável	Média (n.º/cm²)	Desvio Padrão (SD)	Posição (Rank)	Grupos
T1	30	21,0	15	b
T2	235	456,8	25	ab
T3	479	351,3	41	a
T4	69	84,6	18	b
T5	405	400,6	34	ab
T6	334	330,9	32	ab

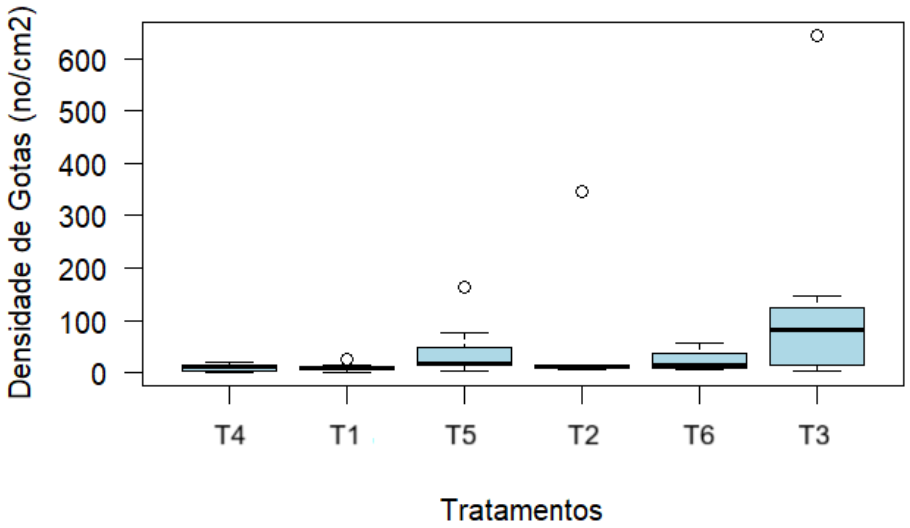
Legenda: x^2 = 17.48844; p = 0.00366083; p ajustado = holm; ntr = 6; α = 0.05.
Fonte: Müller et al. (2025)

3.1.2 TERÇO MÉDIO

Conforme visualizado no box plot (Figura 3), a mediana da densidade de gotas foi substancialmente maior no tratamento T3 em comparação com os demais tratamentos. Notavelmente, alguns pontos individuais fora do IQR chamados “outliers” foram identificados nos tratamentos T1, T2, T3 e T5, sugerindo a presença de indivíduos com respostas atípicas. A análise estatística através do teste de Kruskal-Wallis apresentou valor significativo de p, demonstrando diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 2). Assim como no terço superior, o teste de comparação múltipla de LSD demonstrou que o tratamento T3 (5 m e 80 L/ha) apresentou a maior média (133,08), embora menor que o valor encontrado para o terço superior. O tratamento T1 (5 m e 20 L/ha) apresentou a menor média entre os tratamentos, enquanto T2 (5 m e 50 L/ha), T4 (3 m e 20 L/ha), T5 (3 m e 50 L/ha) e T6 (3 m e 80 L/ha) não diferiram estatisticamente dos tratamentos T3 e T1, sendo agrupados em "ab". Em geral, os valores de média obtidos no terço médio do dossel foram menores do que no terço superior.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 3 – Box plots para a densidade de gotas no terço médio do dossel.



Legenda: T1 (5 m e 20 L/ha), T2 (5 m e 50 L/ha), T3 (5 m e 80 L/ha), T4 (3 m e 20 L/ha), T5 (3 m e 50 L/ha) e T6 (3 m e 80 L/ha).
Fonte: Müller et al. (2025)

Tabela 2. Análise de Variância (Kruskal-Wallis) e Comparação Múltipla (LSD) para a densidade de gotas no terço médio do dossel.

Variável	Média (n.º/cm²)	Desvio Padrão (SD)	Posição (Rank)	Grupos
T1	10	07,5	17	b
T2	48	111,6	24	ab
T3	133	198,1	39	a
T4	11	07,5	22	ab
T5	42	51,3	33	ab
T6	26	19,1	31	ab

Legenda: x^2 = 12.65413; p = 0.02684477; p ajustado = holm; ntr = 6; α = 0.05.
Fonte: Müller et al. (2025)

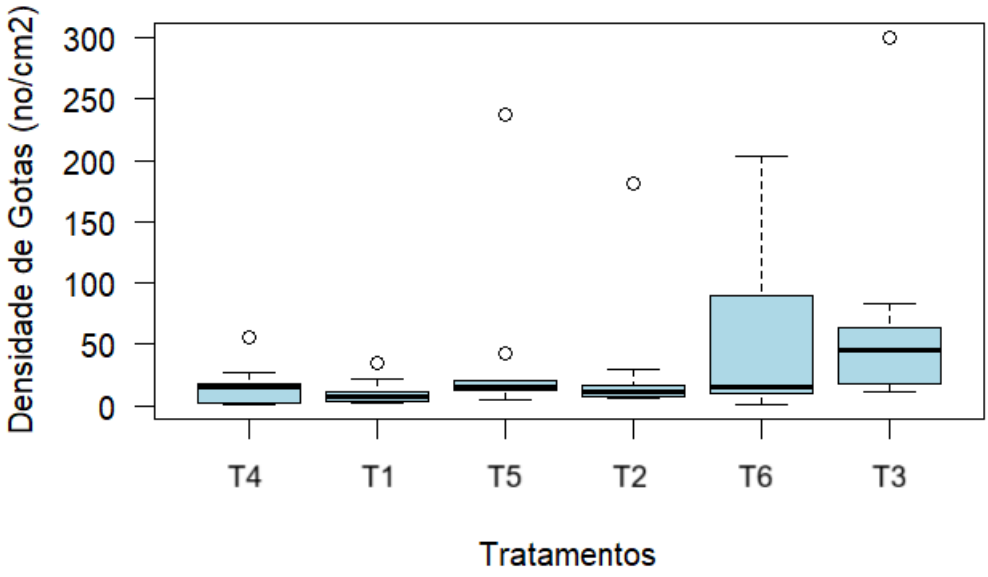
3.1.3 TERÇO INFERIOR

Para o terço inferior observou-se uma mediana consideravelmente maior no tratamento T3 quando comparada aos demais (Figura 4). Também foram observados “outliers” na maioria dos tratamentos indicando uma distribuição de dados não homogênea no terço avaliado. Aplicando-se o teste de Kruskal-Wallis para os dados não paramétricos obteve-se valor de p significativo, sugerindo que há diferenças significativas entre os tratamentos para a densidade de gotas (Tabela 3). O teste de comparação múltipla de LSD indicou três grupos distintos (a, ab, c). Assim como no terço superior e médio o tratamento T3 (5 m e 80 L/ha) obteve destaque na média da densidade de gotas (69,50), ainda que menor em relação as outras variáveis analisadas. O tratamento T1 (5 m e 20 L/ha), assim como o resultado obtido para o terço médio, demonstrou a menor média entre os tratamentos, enquanto os tratamentos T2 (5 m e

ISBN 978-65-990392-6-3

50 L/ha), T4 (3 m e 20 L/ha), T5 (3 m e 50 L/ha) e T6 (3 m e 80 L/ha) não diferiram estatisticamente dos demais tratamentos.

Figura 4 – Box plots para a densidade de gotas no terço inferior do dossel.



Legenda: T1 (5 m e 20 L/ha), T2 (5 m e 50 L/ha), T3 (5 m e 80 L/ha), T4 (3 m e 20 L/ha), T5 (3 m e 50 L/ha) e T6 (3 m e 80 L/ha).
Fonte: Müller et al. (2025)

Tabela 3. Análise de Variância (Kruskal-Wallis) e Comparação Múltipla (LSD) para a densidade de gotas no terço inferior do dossel.

Variável	Média (n.º/cm²)	Desvio Padrão (SD)	Posição (Rank)	Grupos
T1	11	10,9	18	b
T2	32	56,4	25	ab
T3	70	89,9	40	a
T4	17	17,1	24	ab
T5	41	74,6	29	ab
T6	55	72,3	29	ab

Legenda: x^2 = 9.880439; p = 0.07869471; p ajustado = holm; ntr = 6; α = 0.05.
Fonte: Müller et al. (2025)

3.2 DISCUSSÕES

Ao contrário dos resultados obtidos por Cunha et al. (2023) onde constatou-se que o aumento da altura de voo promovia a redução na deposição de calda, nesta análise obteve-se melhores resultados para a maior altura avaliada em todos os terços da cultura, corroborando com o constatado por Da Vitória et al. (2022), onde o menor valor de cobertura foi obtido

ISBN 978-65-990392-6-3

quando pulverizado a uma altura de voo abaixo de 2 m, constatando-se que a proximidade com o dossel da cultura impede que a cobertura seja mais uniforme, além de aumentar a variabilidade na densidade de gotas no terço superior, conforme observado neste trabalho. À medida que se aumenta a altura de voo, maiores são as chances de homogeneidade de cobertura. Entretanto, quanto maior for a altura de voo maior será o risco de ocorrência de deriva. A uniformidade na distribuição da densidade de gotas entre as diferentes posições no dossel da videira é um desafio e conforme Biglia et al. (2022) evidênciam como a distância relativa entre a fonte de pulverização e o alvo é um parâmetro chave, independentemente da tecnologia de aplicação utilizada.

Em consonância ao observado por Wang et al. (2022) que obteve resultado satisfatório em pomares montanhosos utilizando uma taxa de aplicação de, pelo menos, 63,5 L/ha, pode-se observar que houve influência significativa desse fator em relação a densidade de gotas, demonstrando que o volume de 80 L/ha, quando aplicado a 5 m de altura, apresenta excelente resultado para o número de gotas por cm^2, atendendo ao mínimo exigido para o controle efetivo de doenças. Biglia et al. (2022) verificaram que mesmo na melhor configuração de modo de voo, pontas de pulverização e velocidade de voo para aplicações em vinhedos a taxa de aplicação utilizada de 53 L/ha demonstrou ser insuficiente para garantir uma densidade de gotas adequada para aplicações de inseticidas ou fungicidas, Segundo Li et al. (2022), aplicações de ultrabaixo volume são adotadas para pulverizações com drones agrícolas em pomares com uma taxa de aplicação de 45–150 L/ha.

De acordo com recomendação de Garrido e Botton (2015), para o controle de doenças fúngicas da videira, o tratamento 3 apresentou valores satisfatórios de densidade de gotas, em todos os terços avaliados do dossel, tanto para aplicações de fungicidas sistêmicos quanto para aplicações de fungicidas de contato. Porém, ao se considerar apenas a aplicação de produtos sistêmicos, observa-se que, os tratamentos T2 (5 m e 50 L/ha) e T5 (3 m e 50 L/ha) apresentam valores de média para densidade de gotas, em todos os terços avaliados, que suprem a demanda necessária para o controle efetivo de doenças fúngicas (20 – 30 gotas/cm^2), podendo então serem adotados nesse manejo. De todos os tratamentos avaliados apenas o T1 (5 m e 20 L/ha) não apresentou resultados satisfatórios em nenhum dos terços analisados, sendo, portanto, considerado inadequado para a recomendação como parâmetro para a aplicação aérea com drones em videiras.

4 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a deposição de gotas de pulverização aérea em videiras conduzidas em espaldeira é significativamente influenciada pela combinação de altura de voo e taxa de aplicação. O tratamento que utilizou a maior altura de voo (5 m) e a maior taxa de aplicação (80 L/ha), identificado como T3, foi o mais eficaz. Este tratamento proporcionou a maior densidade de gotas em todos os terços do dossel (superior, médio e inferior), atendendo aos requisitos para o controle efetivo de doenças fúngicas.

A análise revelou que o tratamento T1 (5 m e 20 L/ha) foi o menos eficaz e inadequado para recomendação, pois não apresentou resultados satisfatórios em nenhum dos terços da cultura. Para o manejo com produtos sistêmicos, os tratamentos T2 (5 m e 50 L/ha) e T5 (3 m e 50 L/ha) também se mostraram viáveis.

Em suma, a distância relativa entre a fonte de pulverização e o alvo é um parâmetro chave para a distribuição de gotas. Para a otimização da pulverização com drone em videiras em espaldeira, a combinação de 5 m de altura de voo com 80 L/ha de taxa de aplicação é a mais eficaz para garantir uma densidade de gotas adequada em toda a estrutura da planta.

ISBN 978-65-990392-6-3

AGRADECIMENTOS

À Embrapa Uva e Vinho, pela colaboração e disponibilização de vinhedo para a nossa pesquisa.

À Texag Sul, pela parceria e disponibilização da aeronave remotamente pilotada para as avaliações.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ANDEF – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE DEFESA VEGETAL. **Manual de tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários**. Campinas: Línea Criativa, 2004. 52p.

BIGLIA, A. et al. UAV-spray application in vineyards: Flight modes and spray system adjustment effects on canopy deposit, coverage, and off-target losses. **Science of the Total Environment**, v. 845, p. 157292, 2022.

BYERS, Coleman et al. Spray Performance Characterization of a Dji Agras T30 Drone Sprayer at Varying Heights, Speeds and Nozzle Types. In: **ASA, CSSA, SSSA International Annual Meeting**. ASA-CSSA-SSSA, 2023.

CAVALCANTI, F.R.; MULLER, L.S. **Caracterização da pulverização por drone classe III com ponta 110-015 em dois sistemas de condução de videira**. Embrapa. Circular Técnica 165. Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, 2023. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1156770/caracterizacao-da-pulverizacao-por-drone-classe-iii-com-ponta-110-015-em-dois-sistemas-de-conducao-de-videira. Acesso em: 30 jul. 2025.

COSTA, L. L. et al. Contribuições da Tecnologia de Aplicação para o Manejo de Organismos Alvo. In: COSTA, L. L.; POLANCZYK, R. A. (ed.) **Tecnologia de Aplicação de Caldas Fitossanitárias**. Jaboticabal: Funep, 2019. cap. 1, p. 6–23.

CUNHA, J. P. A. R.; SILVA, M. R. A. Spray deposition from a remotely piloted aircraft on the corn crop. **Revista Ciência Agronômica**, v. 54, p. e20217862, 2023.

DA VITÓRIA, E. L. et al. Effect of flight operative height and genotypes on conilon coffee spraying using an unmanned aerial vehicle. Coffee Science-ISSN 1984-3909, v. 17, p. e172003-e172003, 2022.

DO NASCIMENTO, V. P.; DA VITÓRIA, E. L. Spraying quality using unmanned aerial vehicle in citrus. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**, v. 30, n. Contínua, p. 214-221, 2022.

FREITAS, B. R. et al. Variação da taxa de aplicação e pontas de pulverização sobre a produtividade, severidade e controle da ferrugem da soja. In: **X SINTAG - Simpósio Internacional de Tecnologia de Aplicação**, 2022. Anais [...]. Porto Alegre - RS, 2022.

ISBN 978-65-990392-6-3

GARRIDO, L. da R.; BOTTON, M. 25 recomendações técnicas para o viticultor: dicas para controlar pragas e doenças da videira. Bento Gonçalves, RS: Secretaria de Desenvolvimento Rural: Ibravin: Embrapa, 2015. 48 p.

GRELLA, M. et al. Field assessment of a pulse width modulation (PWM) spray system applying different spray volumes: Duty cycle and forward speed effects on vines spray coverage. **Precision Agriculture**. v. 23, n. 1, p. 219–252, 2022.

GUO, S. et al. Assessing the application of spot spray in Nanguo pear orchards: Effect of nozzle type, spray volume rate and adjuvante. **Pest Management Science**. v. 78, n. 8, p. 3564–3575, 2022.

HAFEEZ, A. et al. Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: a review. **Information Processing in Agriculture**, v. 10, p. 192-203, 2023.

HOU, C. J., et al. Optimization of control parameters of droplet density in citrus trees using UAVs and the Taguchi method. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**. v. 12, n. 4, p. 1-9, 2019.

JUNGES, A. H.; TONIETTO, J. Caracterização climática da precipitação pluvial e temperatura do ar em Bento Gonçalves e Veranópolis, Serra Gaúcha, Brasil. **Agrometeoros**, v. 30, 2022.

LI, L. et al. Effect of flight velocity on droplet deposition and drift of combined pesticides sprayed using an unmanned aerial vehicle sprayer in a peach orchard. **Frontiers in Plant Science**. v. 13, p. 981494, 2022.

LIU, Y. et al. Assessment of spray deposition and losses in an apple orchard with an unmanned agricultural aircraft system in China. **Transactions of the ASABE**, v. 63, n. 3, p. 619-627, 2020.

MANDELLI, Francisco et al. Fenologia da videira na Serra Gaúcha. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 9, n. 1/2, p. 129-144, 2003.

MARTINEZ GUANTER, J. et al. Spray and economics assessment of a UAV based ultra low volume application in olive and citrus orchards. **Precision Agriculture**, v. 21, n. 1, p. 226–243, 2020.

MATUO, T. **Técnicas de aplicação de defensivos agrícolas**. Funep, 1990.

MENG, Y. et al. Experimental evaluation of UAV spraying for peach trees of different shapes: Effects of operational parameters on droplet distribution. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 170, p. 105282, 2020.

MIRANDA, M. P. et al. Insecticide application using an unmanned aerial vehicle for Diaphorina citri control in citrus orchards. **Journal of Applied Entomology**, v. 147, n. 9, p. 716-727, 2023.

NANSEN, C.; FERGUSON, J. C.; MOORE, J.; GROVES, L.; EMERY, R.; GAREL, N.; HEWITT, A. Optimizing pesticide spray coverage using a novel web and smartphone tool, SnapCard. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 35, p. 1075-1085, May 2015. DOI 10.1007/ s13593-015-0309-y.

ISBN 978-65-990392-6-3

QI, P. et al. Effect of operational parameters of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) on droplet deposition in trellised pear orchard. **Drones**, v. 7, n. 1, p. 57, 2023.

RIBEIRO, L. F. O. et al. Impact of Operational Parameters on Droplet Distribution Using an Unmanned Aerial Vehicle in a Papaya Orchard. **Agronomy**, v. 13, n. 4, p. 1138, 2023.

SOUZA, F. R. et al. **Drones na aviação agrícola: atuação dos rpas no agronegócio**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Aviação Civil) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2022.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 3o ed. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar.: [s. n.], 2018.

VALLADARES, G. S.; LUZ, N. B. D.; OLIVEIRA, Y. M. M. de. “Solos Da Unidade Experimental Da Embrapa Uva E Vinho Em Bento Gonçalves, RS”. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. Anais eletrônicos: Solos, sustentabilidade e qualidade ambiental. Recife: SBCS, 4 p., 2005.

VERMA, A. et al. Feasibility study on hexacopter UAV based sprayer for application of environment-friendly biopesticide in guava orchard. **Journal of Environmental Biology**, v. 43, n. 1, p. 97-104, 2022.

ZHANG, H. et al. Numerical simulation of airflow field from a six-rotor plant protection drone using lattice Boltzmann method. **Biosystems Engineering**, v. 197, p. 336–351, 2020.

ZHENG, Y. et al. The computational fluid dynamic modeling of downwash flow field for a six-rotor UAV. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 5, n. 2, p. 159-167, 2018.

WANG, C. et al. Assessment of spray deposition, drift and mass balance from unmanned aerial vehicle sprayer using an artificial vineyard. **Science of The Total Environment**, v. 777, p. 146181, 2021.

WANG, C. et al. Spray performance evaluation of a six-rotor unmanned aerial vehicle sprayer for pesticide application using an orchard operation mode in apple orchards. **Pest Management Science**, v. 78, p. 2449–2466, 2022.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 51

IMPLICAÇÕES DA CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA EM ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DA SANIDADE EM *EUCALYPTUS SALIGNA* SM.

Implications of radiometric calibration in vegetation indices for assessing the health of Eucalyptus saligna Sm.

Sally Deborah Pereira da Silva[1]; Lúcio de Paula Amaral[1,4], Gustavo Vedooto Ferreira[1]; Regiane Aparecida Ferreira[2], Norton Borges Junior[1,3]; Telmo Jorge Carneiro Amado[4]

[1]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal – Universidade Federal de Santa Maria/UFSM, Avenida Roraima n.º 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria — RS, Brasil, sallydeborah@outlook.com, lucio.amaralufsm@ufsm.br; engflorestalgustavovedootof@gmail.com, norton.borges@cmpcrs.com.br,

[2]Eng. Florestal, Mestre em Agricultura de Precisão, PPGAP/UFSM, Avenida Roraima n.º 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria — RS, Brasil, regianeferreira1891@gmail.com

[3]Pesquisador da empresa florestal CMPC Brasil, Guaíba-RS, PPGEF/UFSM, UFSM

[4]Professor, PPGAP- Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria/UFSM, Avenida Roraima n.º 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria — RS, Brasil

RESUMO

Este estudo teve por objetivo avaliar o efeito da calibração radiométrica (com CRP e DLS2 versus imagem bruta não calibrada) na acurácia de índices de vegetação derivados do sensor *MicaSense RedEdge MX*® e comparar duas classes de plantas, eucaliptos saudáveis e eucaliptos sob estresse. As imagens foram adquiridas com o sensor multiespectral *RedEdge MX*® e processadas no software *Agisoft Metashape*. Foram calculados cinco índices (NDVI, GNDVI, NDRE, CCCI e PSRI), com e sem calibração, para ambas as classes. As estatísticas descritivas e o teste de Mann-Whitney indicaram diferenças significativas entre os valores dos índices obtidos em cada condição, com maior variabilidade nos dados não calibrados. Em especial, plantas estressadas foram mais sensíveis às distorções espectrais causadas pela ausência de calibração. Os resultados reforçam a importância do uso de painéis de referência e sensores de luz incidente (como o DLS2) no pré-processamento. A calibração radiométrica demonstrou ser fundamental para assegurar confiabilidade e repetibilidade nos dados espectrais.

Palavras-chave: ARP. Silvicultura de Precisão. Sensoriamento remoto. Saúde florestal.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effect of radiometric impairment (with CRP and DLS2 versus uncalibrated raw image) on the accuracy of accumulation indices obtained from the MicaSense RedEdgeMX® sensor and compare two classes of plants: tall eucalyptus and stressed eucalyptus. The images were acquired with the RedEdge MX® multispectral sensor and processed in Agisoft Metashape software. Five indices (NDVI, GNDVI, NDRE, CCCI, and PSRI) were calculated for both classes, with and without impairment. Descriptive statistics and the Mann-Whitney test indicated significant differences between the index values obtained in each condition, with greater variability in the uncalibrated data. Stressed plants were more sensitive to spectral distortions caused by the absence of impairment. The results reinforce the importance of using reference panels and incident light sensors (such as DLS2) in preprocessing. The radiometric specification demonstrated is critical for the safety and repeatability of spectral data.

Keywords: UAV. Precision Forestry. Remote Sensing. Forest Health.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

O surgimento das aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) e dos sensores espectrais causou um avanço no campo do sensoriamento remoto (SR), permite a aquisição de imagens em bandas espectrais específicas mais estreitas (evita contaminação de dados entre bandas), sem sobreposição e com altíssima resolução espacial (MAES e STEPP, 2019). Imagens multiespectrais têm sido amplamente utilizadas na agricultura e silvicultura de precisão para estimar o teor de nitrogênio (EUGENIO et al., 2023), detectar doenças e avaliar o estado de saúde das plantas (ANDAWER et al., 2024), identificar espécies invasoras e realizar o mapeamento individual de árvores (da SILVA et al., 2023a, b; RITCHER et al., 2025), dentre outros usos.

Para essas finalidades, diversos fabricantes desenvolveram câmeras multiespectrais específicas para operação embarcada em ARPs. A maioria desses sistemas, como o *MicaSense RedEdge*®, *Parrot Sequoia*® e *DJI Multispectral*®, utiliza sensores separados para cada banda espectral. Essas câmeras foram projetadas com foco na usabilidade, com integração de receptores GNSS, sensores de irradiância e compatibilidade com os principais softwares de processamento de imagens (DANIELS et al., 2023).

Contudo, para que possam ser interpretadas ou utilizadas no cálculo de índices de vegetação (IV), as imagens multiespectrais devem ser convertidas em dados de reflectância. Esse processo, denominado calibração radiométrica, é apontado como um dos principais entraves tecnológicos à aplicação eficaz de ARPs no SR (WALKER et al., 2022). Diversas abordagens de calibração têm sido propostas, embora apenas algumas estejam implementadas em softwares comerciais ou disponíveis em plataformas de código aberto (*Pix4D*, 2020; AGISOFT, 2022; MICASENSE, 2022; PELL et al., 2022).

A eficácia desses métodos é dependente das condições de aquisição das imagens. Por exemplo, Wang et al. (2021) demonstraram que o procedimento padrão com painel de calibração (*Calibrated Reflectance Panel* - CRP) da *RedEdge M* (*Micasense*) apresenta desempenho razoável, exceto na banda NIR e em dias nublados, sendo mais instável nessas condições. Os autores propuseram um modelo de calibração "*at-sensor*" que combina CRP e DLS (*Downwelling Light Sensor*), que reduz significativamente os impactos locais e melhora a qualidade da reflectâncias

Daniels et al. (2023) compararam cinco métodos de calibração ao utilizarem a câmera *MicaSense RedEdge MX Dual* e concluíram que o método *Empirical Line Method* (ELM) com múltiplos alvos oferece menor viés e RMSE, especialmente em condições nubladas. Métodos comerciais com painel único demonstraram precisão semelhante em céu limpo, enquanto o uso do sensor DLS2 não resultou em melhorias na acurácia, mesmo sob intensa ocorrência de nuvens.

Além dos efeitos relacionados ao sensor, como sensibilidade, ganho, obscurecimento e vinhetagem, fatores ambientais como a cobertura de nuvens e a posição solar afetam fortemente a irradiância incidente e a reflectância registrada. Esses efeitos são amplamente documentados na literatura (SMITH e MILTON, 1999; MAMAGHANI e SALVAGGIO, 2019), de modo que a calibração radiométrica busca corrigi-los para garantir a comparabilidade temporal e espacial dos dados (PELL et al., 2022). Apesar dessas evidências, há escassez de estudos que comparem diretamente índices de vegetação com e sem calibração radiométrica utilizando o sensor *RedEdge MX* em povoamentos homogêneos, como de *Eucalyptus* em plantios comerciais.

Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da calibração radiométrica (com CRP e DLS2 versus imagem bruta não calibrada) na acurácia de índices de vegetação

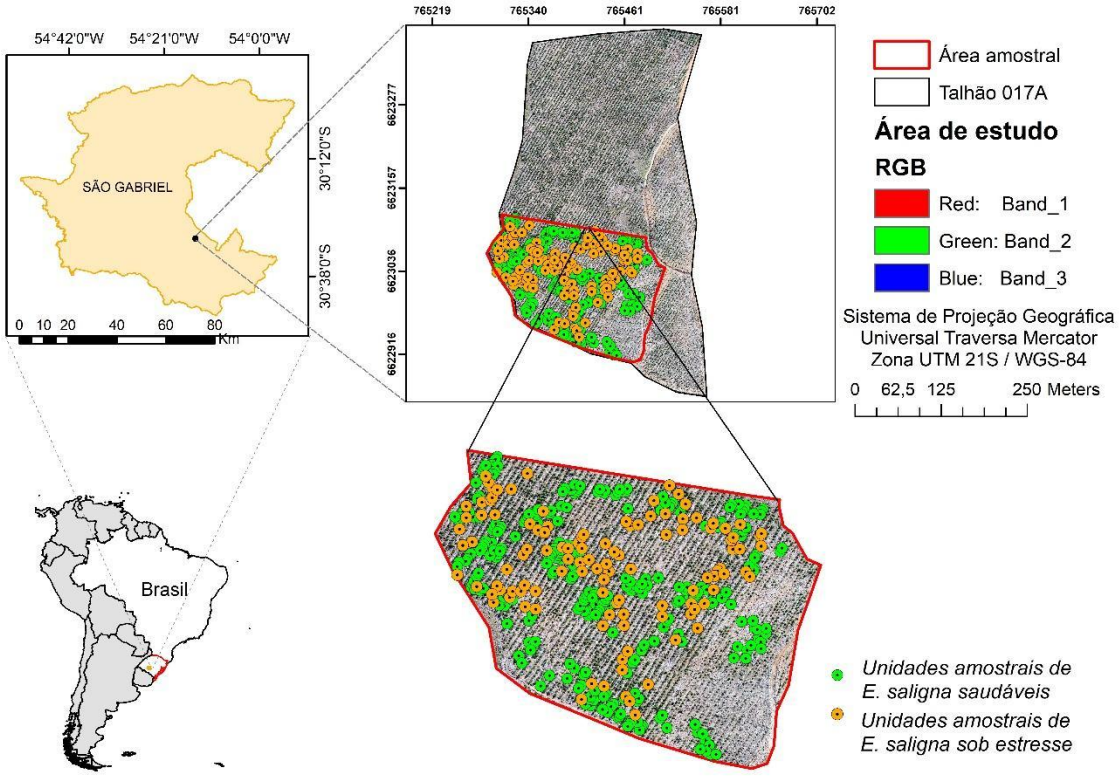
derivados do sensor *MicaSense RedEdge MX*®, comparando duas classes de plantas em plantio comercial, sendo eucaliptos saudáveis e eucaliptos sob estresse fisiológico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde a um talhão de floresta comercial pertencente à empresa Celulose Riograndense Ltda. (CMPC), situado na zona rural do município de São Gabriel, na região fisiográfica da Campanha Gaúcha, fronteira oeste do Estado do Rio Grande do Sul. O plantio integra o Projeto Vacacaí (Figura 1), com talhões em rotação de ciclo de produção, replantado no atual ciclo de produção com mudas clonais de *E. saligna*, com seis meses de idade, espaçamento de 3,5 x 2,14 m.

Figura 1 - Localização da área de estudo no plantio clonal de *E. saligna*, Projeto Vacacaí/CMPC, São Gabriel-RS, Brasil.



Fonte: Autores (2025).

O clima da região é classificado como subtropical úmido (Cfa), com temperatura média anual superior a 18ºC, e média pluviométrica de 1650 mm por ano (ALVARES et al., 2013). Os solos são identificados como predominantes nas planícies de inundações planossolos háplicos eutróficos arênicos. Nas cotas mais altas ocorrem os argissolos vermelho distrófico arênicos e os neossolos quartzarênico órticos ambos de textura arenosa, e muito suscetíveis a erosão (EMBRAPA, 2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

2.2.1 Aquisição de dados de campo e amostragem

No talhão 017A, foram selecionadas em campo, aleatoriamente 15 plantas de *E. saligna* para cada classe de sanidade, totalizando 30 indivíduos. As classes foram definidas segundo os seguintes critérios:

- Plantas saudáveis: indivíduos com folhas verdes, crescimento vigoroso e uniforme, tronco retilíneo, sem deformações visíveis, e sistema radicular bem desenvolvido.
- Plantas sob estresse (sintomáticas de má formação radicular): indivíduos com folhas marrom-avermelhadas (aspecto de bronzeamento), menor densidade de copa, redução no crescimento, espessamento do colo, e suscetibilidade a tombamento ou quebra do fuste.

Posteriormente, foi selecionada uma área amostral de três hectares, onde foram criadas unidades amostrais das duas classes de sanidade estabelecidas. A seleção foi realizada com base na observação direta das imagens e na inspeção visual das características morfológicas em campo. Todas as plantas foram georreferenciadas em campo, para coleta de seus dados nos mosaicos de IVs, a fim de caracterizar devidamente plantas de cada classe de sanidade (critério de classificação).

2.2.1 Aquisição de dados remotos

As imagens foram obtidas com uso de uma ARP do tipo multirrotor, Modelo *Phantom 4 Advanced Plus*® (*Shenzhen DJI Sciences and Technologies, Shenzhen*, China). Trata-se de um equipamento leve (1388 g), equipado com um sensor CMOS de 20 megapixels (MP), que gera imagens em composição RGB, possui obturador mecânico e tempo de voo aproximado de 30 minutos.

Para a aquisição das imagens multiespectrais, foi utilizada a câmera *RedEdge-MX*® (*MicaSense*, 2015), embarcada na ARP. Esse sensor captura imagens em cinco bandas espectrais estreitas, sendo três no espectro visível (azul, verde e vermelho), uma na região da borda vermelha (*red-edge*) e uma no infravermelho próximo (*Near Infrared – NIR*), com resolução espacial de 1,2 (MP).

O sistema inclui ainda o sensor de luz ambiente DLS2, acoplado à ARP e conectado à câmera, responsável por registrar dados auxiliares — como irradiância incidente, coordenadas geográficas e orientação do sensor — utilizados para a correção radiométrica e geolocalização das imagens, em tempo real. Os valores de albedo requeridos para a correção radiométrica foram obtidos por meio de um painel de calibração fornecido juntamente com o sensor *RedEdge-MX*® (*serial number* RP04-1901003-SC). As especificações técnicas detalhadas do sensor estão apresentadas no Quadro 1.

A aquisição das imagens em campo seguiu uma sequência metodológica padronizada, que incluiu a geração do plano de voo, sinalização dos pontos de controle no solo (PCs), testes e verificações operacionais da ARP, bem como as etapas de decolagem e pouso, com o objetivo de garantir a qualidade dos dados obtidos. Os PCs foram georreferenciados com uso de receptor GNSS modelo Polaris S100®, montado em um bastão topográfico com bolha de nível circular, estabilizado por bipé. O rastreamento foi realizado por meio do método relativo pós-processado, com o método de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), que resultou em

ISBN 978-65-990392-6-3

erro posicional médio da ordem de 15 centímetros. O Pós-processamento foi realizado no serviço PPP/IBGE, um serviço gratuito disponibilizado na página web do IBGE[1].

Quadro 1 - Especificações técnicas dos equipamentos utilizados na coleta de dados aéreos

RedEdge MX®		**DLS2®**	
Cinco bandas espectrais de 1,2 MP obturador global de 12 bits		Cinco sensores espectrais com os mesmos filtros da câmera	
Bandas espectrais	*Blue* – 475 nm ± 40 nm	**Albedo do painel de calibração (RP04-1901003-SC)**	*Blue – 0,514*
	Green – 560 nm ± 20 nm		*Green – 0,515*
	Red – 668 nm ± 10 nm		*Red – 0,514*
	Red-edge – 717 nm ± 10 nm		*Red-edge – 0,513*
	NIR – 840 nm ± 40 nm		*NIr – 0,511*

Fonte: MicaSense (2015).

O plano de voo foi elaborado no aplicativo *Precision Flight*, versão 2.4.2 de distribuição gratuita, com configuração dos seguintes parâmetros operacionais, altitude de 60 m, velocidade de voo de 10 m/s, sobreposição lateral de 70% e sobreposição frontal de 75%. As aquisições foram realizadas no dia 30 de abril de 2025, no intervalo entre 10h30 e 11h00 AM.

2.3 PROCESSAMENTO DE DADOS

2.3.1 Geração dos ortomosaicos

As imagens foram extraídas do cartão de memória da câmera *RedEdge-MX*® (*Micasense*) e processadas no *software Agisoft Metashape*® (Agisoft LLC, São Petersburgo, Rússia). O processamento seguiu o fluxo fotogramétrico padrão, com o alinhamento inicial das imagens georreferenciadas, considerando os parâmetros internos e externos do sensor, o que permitiu a correção das distorções geométricas e a identificação automática de pontos homólogos e geração da nuvem de pontos esparsa.

Em seguida, foram inseridas as coordenadas dos PCs, com a identificação manual dos respectivos alvos nas imagens. Após essa etapa, realizou-se a otimização e o realinhamento da nuvem de pontos esparsa, para obter maior acurácia posicional em relação ao terreno. A nuvem foi então densificada, a partir da qual foi gerado o Modelo Digital de Superfície. Por fim, foram obtidos ortomosaicos no formato *GeoTIFF*, e *ground simple distance* (GSD) de 4,18 cm/pixel.

Para a análise comparativa, o processamento foi conduzido em dois fluxos distintos, (i) com aplicação da calibração radiométrica, com uso de dados de irradiância do sensor DLS2 e

[1] https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=processar-os-dados

ISBN 978-65-990392-6-3

os valores de albedo do painel de calibração, e (ii) sem aplicação de calibração radiométrica, mantendo os valores digitais brutos (não corrigidos) dos arquivos capturados.

Ao final de cada fluxo, as bandas espectrais individuais (*blue, green, red, red-edge* e *NIR*) foram exportadas separadamente em formato *GeoTIFF*, tanto para o conjunto calibrado quanto para o não calibrado. Esses produtos serviram como base para o cálculo IVs, que permitiram a comparação entre os resultados obtidos com e sem calibração radiométrica.

2.3.2 Índices de vegetação

Cinco IVs foram selecionados com base em estudos prévios, considerando as bandas espectrais disponíveis nas imagens multiespectrais e associação com estresse fisiológico e cobertura foliar das plantas. Os índices foram calculados a partir dos ortomosaicos multiespectrais recortados com base na área amostral do talhão 017A, utilizando-se como máscara espacial o *shapefile* correspondente à delimitação da parcela. Para fins comparativos, os IVs foram calculados separadamente com base nas imagens calibradas (com aplicação da correção radiométrica via DLS2 e painel de reflectância) e não calibradas (valores digitais brutos), para a avaliação dos efeitos da calibração sobre os valores espectrais derivados.

O processamento foi conduzido em ambiente R, de forma automatizada, com uso das bibliotecas *terra* (HIJMANS et al., 2022) e *Simple Features* – sf (PEBESMA, 2018). Os IVs gerados foram exportados no formato *GeoTIFF* e empregados nas análises estatísticas subsequentes. Os cinco IVs calculados foram, NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*), NDRE (*Normalized Difference Red Edge Index*), PSRI (*Plant Senescing Reflectance Index*), CCCI (*Canopy Chlorophyll Content Index*). A descrição detalhada dos índices e bandas utilizadas encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Índices de vegetação utilizados no estudo.

Índices de Vegetação	Expressão matemática	Referência
NDVI	$\frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}}$	Rouse *et al*. (1974)
NDRE	$\frac{R_{NIR} - R_{REDEDGE}}{R_{NIR} + R_{REDEDGE}}$	Barnes *et al*. (2000)
GNDVI	$\frac{R_{NIR} - R_{GREEN}}{R_{NIR} + R_{GREEN}}$	Gitelson e Merzlyak (1994).
CCCI	$\frac{R_{NIR} - R_{REDEDGE}/R_{NIR} + R_{REDEDGE}}{R_{NIR} - R_{RED}/R_{NIR} + R_{RED}}$	Barnes *et al*. (2000)
PSRI	$\frac{R_{RED} - R_{GREEN}}{R_{REDEDGE}}$	Merzlyak *et al*. (1999).

Onde: R_{NIR} refere-se a reflectância na banda do infravermelho próximo.

2.3.2 Amostragem e extração de estatísticas zonais

Para cada classe de sanidade de *E. saligna (*plantas saudáveis e plantas sob estresse), *shapefiles* com pontos georreferenciados foram digitalizados com base na inspeção visual do

ISBN 978-65-990392-6-3

ortomosaico RGB, garantindo a correspondência espacial com os alvos de campo (valores coletados na área de projeção das copas das plantas).

Sobre os pontos, foram gerados *buffers* circulares de 40 cm de raio, utilizados como regiões de amostragem para extrair os valores dos IVs, tanto nas versões calibradas quanto não calibradas. A extração das estatísticas zonais (média, mediana, mínimo e máximo) foi realizada com a função *extract*() da biblioteca *terra* em ambiente R, resultando em tabelas com identificadores únicos por unidade amostral.

2.4 ANÁLISE ESTATISTICA

A análise estatística foi conduzida com o objetivo de comparar os valores dos IVs (NDVI, NDRE, GNDVI, CCCI e PSRI) obtidos com e sem calibração radiométrica, separadamente para as classes “plantas saudáveis” e “plantas sob estresse”. Inicialmente, os dados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk), com nível de significância de 5% ($p > 0,05$). Em seguida, realizou-se a estatística descritiva por grupo, com obtenção de média, mediana, desvio padrão, valores mínimos, valores máximo e coeficiente de variação (CV%).

Como os dados não atenderam aos critérios de normalidade, foi aplicado o teste de Mann-Whitney (U de Wilcoxon) para comparação entre as distribuições das condições com e sem calibração, para cada índice e classe. Todas as análises foram realizadas em ambiente R (versão 4.4.1).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta a variabilidade espacial dos cinco índices de vegetação (NDVI, GNDVI, NDRE, CCCI e PSRI) gerados com e sem calibração radiométrica. Visualmente, observa-se que os mapas calibrados apresentam maior uniformidade espacial, com valores espectrais distribuídos de forma mais consistente entre as parcelas. Em contraste, os mapas sem calibração mostram maior variabilidade e padrões espúrios, como faixas e ruídos lineares associados à variação de iluminação durante o voo.

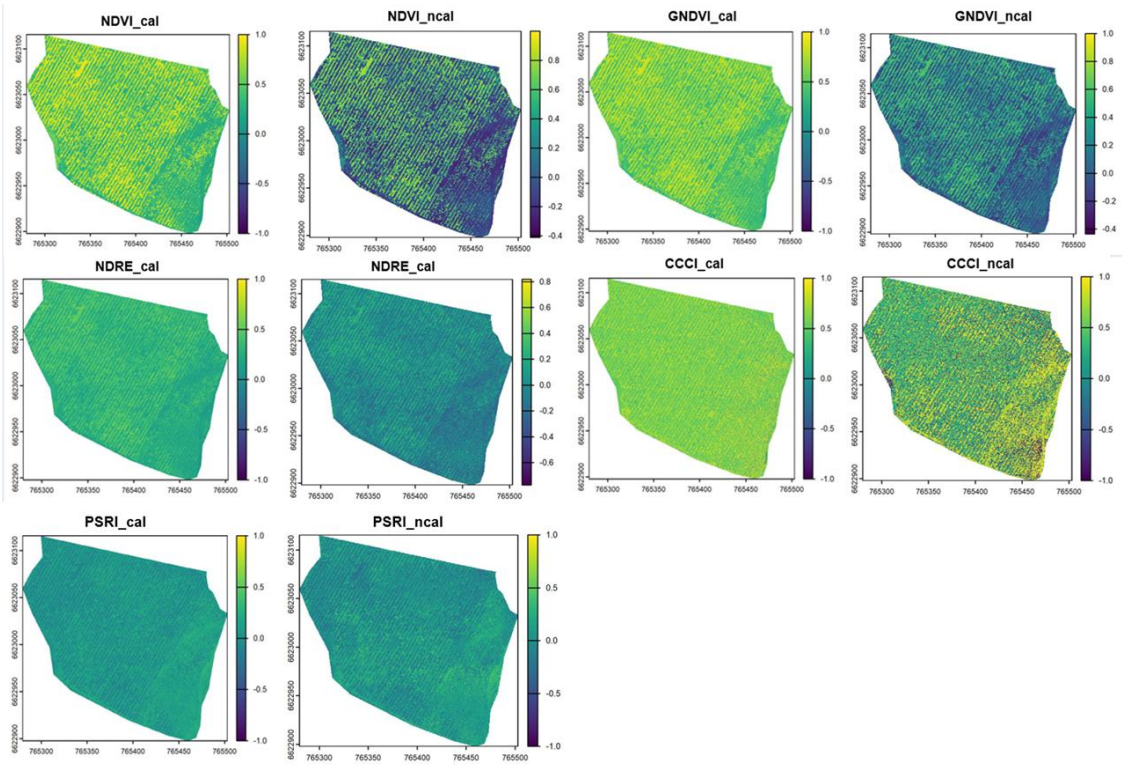
Essas distorções são especialmente visíveis nos índices CCCI, NDVI e GNDVI, nos quais a ausência de correção radiométrica prejudica a interpretação da variabilidade real da vegetação. A diferença entre os produtos indica a importância da calibração para garantir qualidade espectral, confiabilidade das análises e suporte a decisões baseadas em dados multiespectrais.

A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva dos IVs calculados para plantas saudáveis, com e sem aplicação de calibração radiométrica. Observa-se que, para todos os índices, os valores médios e medianos obtidos com calibração foram superiores aos correspondentes sem calibração, o que indica a maior sensibilidade dos IVs calibrados na distinção da condição fitossanitária.

Os CV% foram menores nos dados calibrados, com destaque para o NDVI (1,71%), GNDVI (2,06%) e PSRI (11,1%), o que indica maior homogeneidade nas medidas. Em contraste, os dados sem calibração apresentaram maior variabilidade, com CV% acima de 30% para NDRE e CCCI, o que reforça a importância da calibração radiométrica para redução da dispersão espectral.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2 - Mapas dos índices de vegetação (NDVI, GNDVI, NDRE, CCCI e PSRI) gerados com e sem calibração radiométrica (CRP e DLS2), a partir das imagens multiespectrais do sensor RedEdge MX® para plantas de *E. saligna* saudáveis e sob estresse (30 abril de 2025).



Onde: *cal*: IVs com calibração radiométrica; *ncal*: IVs não calibrados. Fonte: Autores (2025).

Tabela 1 – Estatística descritiva para os índices de vegetação com e sem calibração radiométrica (CRP e DLS2), da classe de plantas saudáveis de *E. saligna*.

	Média	**Mediana**	**DP**	**Min**	**Max**	**CV (%)**	**Shapiro-Wilk *p***
NDVI_*cal*	0,9090	0,9100	0,0160	0,8430	0,9530	1,71	*p < 0,05*
NDVI_*ncal*	0,7800	0,7820	0,0240	0,6740	0,8400	3,05	*p < 0,05*
NDRE_*cal*	0,4430	0,4400	0,0390	0,3400	0,5840	8,89	*p < 0,05*
NDRE_*ncal*	0,1490	0,1510	0,0510	-0,0020	0,2880	34,20	*p < 0,05*
GNDVI_*cal*	0,8300	0,8300	0,0170	0,7740	0,8890	2,06	*p < 0,05*
GNDVI_*ncal*	0,5890	0,5940	0,0360	0,4560	0,6690	6,12	*p < 0,05*
CCCI_*cal*	0,4880	0,4850	0,0410	0,3740	0,6240	8,44	*p < 0,05*
CCCI_*ncal*	0,1910	0,1940	0,0640	-0,0030	0,3610	33,40	*p < 0,05*
PSRI_*cal*	-0,1140	-0,1140	0,0130	-0,1540	-0,0650	11,10	*p < 0,05*
PSRI_*ncal*	-0,1770	-0,1760	0,0250	-0,2510	-0,1150	14,40	*p < 0,05*

Onde: *cal*: IVs com calibração radiométrica; *ncal*: IVs não calibrados. DP: Desvio padrão. Fonte: Autores (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

A Tabela 2 apresenta a estatística descritiva dos IVs calculados para plantas sob estresse, com e sem calibração radiométrica. Assim como observado para a classe saudável, os valores médios e medianos dos IVs foram consistentemente maiores nas imagens calibradas, evidenciando a influência da calibração na amplitude dos valores espectrais.

A variabilidade dos dados foi substancialmente menor nas imagens calibradas, com CV% inferiores a 12% para os índices (exceto PSRI), enquanto os dados sem calibração apresentaram CV% superiores a 50% para NDRE e CCCI, o que reflete grande instabilidade dos valores não corrigidos. No caso do PSRI, mesmo com calibração, o CV% foi elevado (32,7%), o que indica a sensibilidade acentuada desse índice à heterogeneidade da vegetação estressada. O PSRI responde as variações nos teores de clorofila e carotenóides, resultantes dos processos de senescência ou estresse nas plantas (MERZLYAK et al.1999).

Tabela 2 – Estatística descritiva para os índices de vegetação com e sem calibração radiométrica (CRP e DLS2), da classe de plantas de *E. saligna* sob estresse.

IVs	Média	Mediana	DP	Min	Max	CV (%)	Shapiro-Wilk *p*
NDVI_*cal*	0,8730	0,8780	0,0350	0,6680	0,9330	3,99	*p < 0,05*
NDVI_*ncal*	0,6980	0,7170	0,0700	0,3050	0,7870	10,00	*p < 0,05*
NDRE_*cal*	0,3200	0,3180	0,0370	0,2280	0,4500	11,50	*p < 0,05*
NDRE_*ncal*	0,0010	-0,0020	0,0420	-0,0780	0,1060	53,87	*p < 0,05*
GNDVI_*cal*	0,8040	0,8070	0,0240	0,7120	0,8520	2,95	*p < 0,05*
GNDVI_*ncal*	0,5280	0,5330	0,0480	0,3120	0,6210	9,14	*p < 0,05*
CCCI_*cal*	0,3670	0,3680	0,0400	0,2630	0,4830	10,90	*p < 0,05*
CCCI_*ncal*	-0,0010	-0,0030	0,0610	-0,1180	0.1440	53,06	*p < 0,05*
PSRI_*cal*	-0,0770	-0,0790	0,0250	-0,1190	0,0590	32,70	*p < 0,05*
PSRI_*ncal*	-0,1270	-0,1280	0,0380	-0,2190	0,0510	29,80	*p < 0,05*

Onda: *cal*: IVs com calibração radiométrica; *ncal*: IVs não calibrados. DP: Desvio padrão. Fonte: Autores (2025).

Os resultados descritivos demonstram que os índices NDVI, NDRE, GNDVI, CCCI e PSRI apresentaram maiores valores centrais quando calculados a partir de imagens calibradas, tanto para plantas saudáveis quanto estressadas. Esse padrão está de acordo com os observados por Wang (2021), que mostrou que a correção *at-sensor*, integrando painel de calibração (CRP) e sensor de irradiância (DLS2), fornece reflectância de superfície mais confiável, especialmente em bandas críticas como NIR e *red-edge,* que tendem a apresentar saturação ou detecção instável sem calibração adequada.

O CV% dos índices também foi muito menor nas imagens calibradas, que corroboram os resultados de Daniels et al. (2023), que compararam múltiplos métodos de calibração e concluíram que o método ELM com múltiplos alvos reduz o viés e RMSE, particularmente em condições nubladas. Essa redução de variabilidade é essencial para melhorar a sensibilidade espectral e garantir consistência para, por exemplo, detectar estresse em vegetação.

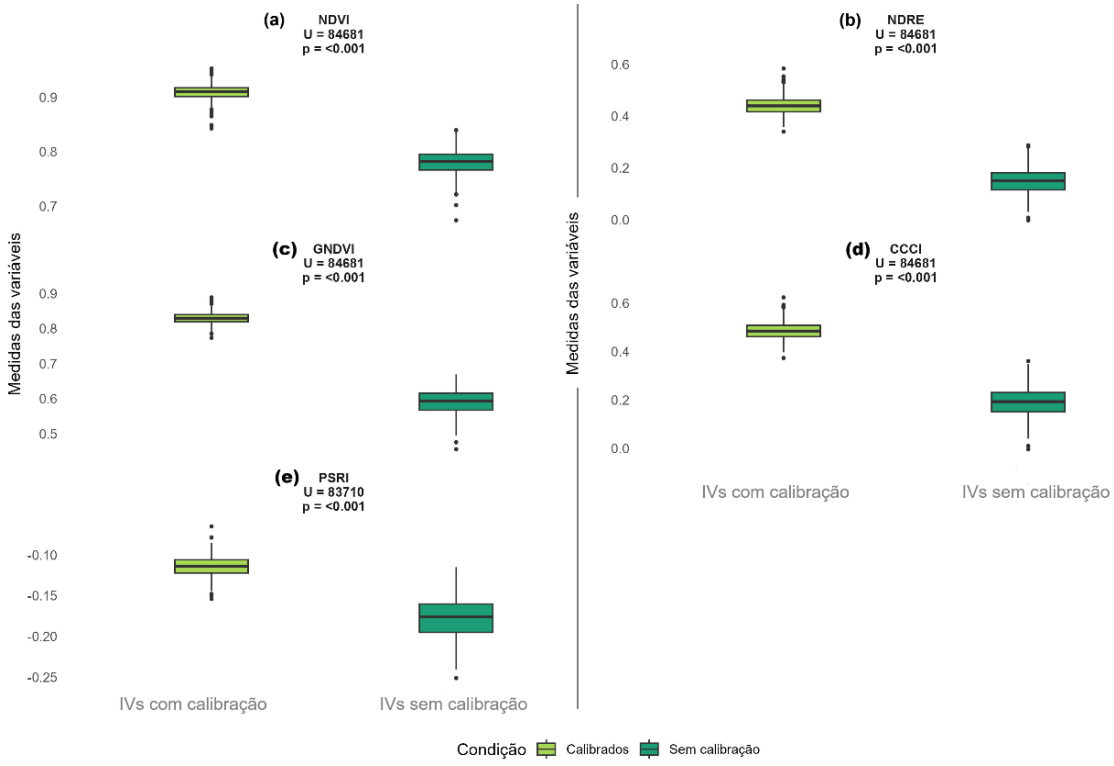
ISBN 978-65-990392-6-3

A comparação entre os IVs obtidos com e sem calibração radiométrica para a classe de plantas saudáveis revelou diferenças estatisticamente significativas (p < 0,001) para todos os índices analisados, conforme teste de Mann-Whitney (Figura 3).

Observa-se que os valores dos índices NDVI (Fig. 3 a), NDRE (Fig. 3 b), GNDVI (Fig. 3 c), CCCI (Fig. 3 d) e PSRI (Fig. 3 e), foram consistentemente mais altos, ou menos negativos no caso do PSRI, nas imagens calibradas. Esses resultados indicam que a calibração radiométrica impacta significativamente os valores obtidos, mesmo em condições de vegetação saudável, sugerindo que o uso de imagens não calibradas pode subestimar a reflectância e comprometer a interpretação espectral (SMITH e MILTON, 1999).

Esses comportamentos são consistentes com estudos de Daniels et al. (2023), que destacam a sensibilidade dos índices à variação na iluminação e à ausência de padronização radiométrica. Do mesmo modo, Wang (2021) demonstrou que a não aplicação de correção *at-sensor* pode gerar desvios significativos nos valores dos IVs e comprometer comparações temporais ou entre tratamentos. Além disso, conforme discutido por Swaminathan et al. (2024), a calibração baseada em sensores de irradiância (DLS) ou painéis de reflectância reduz substancialmente a variabilidade entre cenas, o que otimiza a reprodutibilidade dos dados espectrais.

Figura 3 - Resultados do teste U de Mann-Whitney para comparação dos índices de vegetação obtidos com e sem calibração radiométrica (CRP e DLS2), na classe de plantas *E. saligna* saudáveis.



Fonte: Autores (2025).

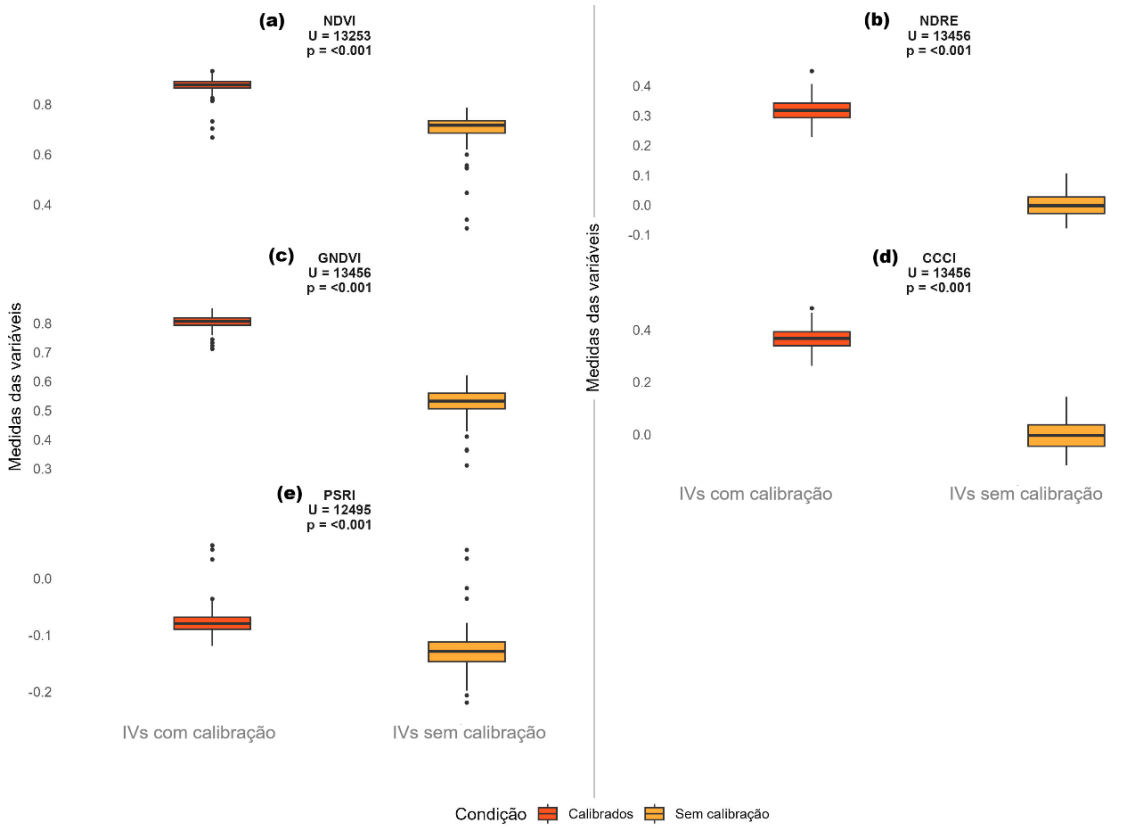
A Figura 4 apresenta os resultados do teste U de Mann-Whitney aplicado para comparar os IVs com e sem calibração radiométrica, para a classe de plantas de *E. saligna* sob estresse. Todas as comparações indicaram diferenças estatísticas significativas (p < 0,001) entre os dois grupos analisados. Os valores dos IVs NDVI (Fig. 4 a), NDRE (Fig. 4 b), GNDVI (Fig. 4 c) e CCCI (Fig. 4 d) foram superiores nas imagens calibradas, o que indica maior sensibilidade espectral mesmo sob condições de estresse. Já o índice PSRI (Fig. 4 e) apresentou valores

ISBN 978-65-990392-6-3

menos negativos nas imagens sem calibração, o que pode levar a interpretações equivocadas sobre a degradação da clorofila e aumento do teor de carotenóides em dosséis estressados.

Essas diferenças demonstram que a ausência de calibração mantém distorções relevantes nos dados, o que altera a distribuição das variáveis espectrais e dificulta a identificação precisa do estado fisiológico ou a inferência sobre a sanidade das plantas. Estas constatações reforçam a importância da calibração radiométrica no processamento de imagens multiespectrais, especialmente em contextos de estudos que visem a sanidade da vegetação.

Figura 4 - Resultados do teste U de Mann-Whitney para comparação dos índices de vegetação obtidos com e sem calibração radiométrica (CRP e DLS2), na classe de plantas de *E. saligna* sob estresse.



Fonte: Autores (2025).

Os resultados obtidos mostraram que os IVs derivados das imagens calibradas apresentaram menor variabilidade (CV%) e maior consistência estatística. Essa melhoria pode ser interpretada de acordo com Pell et al. (2022), que avaliaram diferentes *softwares Structure from Motion* - SfM (incluindo *Agisoft Metashape, Pix4Dmapper, WebODM*) para calibração radiométrica, e concluíram que o Metashape produz saídas mais consistentes e acuradas, com melhores representações de cor, menos artefatos visuais e maior uniformidade espectral (elementos essenciais em monitoramento multitemporal ou comparativo).

Nesse contexto, o uso de CRP e DLS2 alinhado ao processamento no *software Metashape* pode explicar os resultados do presente estudo, onde os dados calibrados mostraram menor dispersão e valores médios mais fidedignos, ressaltando a importância de calibragens bem estruturadas.

Por fim, os resultados indicam a relevância destes estudos visando estabelecer protocolos confiáveis no sensoriamento remoto suborbital acerca da sanidade da vegetação, para possibilitar resultados comparáveis, repetíveis e que permitam interpretar o estado

ISBN 978-65-990392-6-3

fisiológico das plantas/vegetação, elementos fundamentais para aplicações em agricultura e silvicultura de precisão, monitoramento florestal e fitossanidade.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou que a calibração radiométrica em imagens multiespectrais obtidas por sensor embarcado em ARP exerce influência significativa sobre os valores dos índices de vegetação derivados das mesmas, sobretudo em condições de estresse fisiológico. As análises estatísticas indicaram diferenças relevantes entre os índices obtidos com e sem calibração radiométrica, com destaque para o NDRE, CCCI e PSRI, cujas distribuições variaram consideravelmente conforme a classe de plantas analisada (saudáveis e estressadas).

O uso adequado de painéis de referência e sensores de luz incidente (como o DLS2), aliado a fluxos de pré-processamento em *softwares* como o *Agisoft Metashape*, é essencial para assegurar a confiabilidade dos dados. Nesse contexto, a calibração radiométrica deve ser considerada etapa obrigatória em aplicações de sensoriamento remoto voltadas ao monitoramento da sanidade vegetal.

Portanto, recomenda-se a adoção sistemática de processos de calibração radiométrica em imagens multiespectrais obtidas por sensores embarcados em ARP utilizadas em projetos de agricultura e silvicultura de precisão, de modo a garantir dados espectrais consistentes. Estudos futuros podem ampliar esta análise para diferentes espécies, épocas de coleta e condições de iluminação, e contribuir para o aprimoramento das práticas em sensoriamento remoto com ARP.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal e à CAPES pela disponibilidade de bolsa de doutorado e diária (PROAP) - Código de Financiamento 001. Ao projeto Aquarius, da Universidade Federal de Santa Maria, por disponibilizar o sensor multiespectral e à empresa CMPC do Brasil pela disponibilidade da área de estudo e liberação do uso de dados para esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AGISOFT. **Agisoft Metashape: Manuais do Usuário**; Agisoft LLC: São Petersburgo, Rússia, 2023.

ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANWANDER, Julia et al. Evaluating Different Deep Learning Approaches for Tree Health Classification Using High-Resolution Multispectral UAV Data in the Black Forest, Harz Region, and Göttinger Forest. **Remote Sensing**, v. 16, n. 3, p. 561, 2024. https://doi.org/10.3390/rs16030561

ISBN 978-65-990392-6-3

BARNES, E. M. et al. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. In: **Proceedings of the fifth international conference on precision agriculture, Bloomington, MN, USA**. 2000. p. 6.

DA SILVA, Sally Deborah Pereira et al. Identification of invasive trees in a Brazilian subtropical forest using remotely piloted aircraft systems and machine learning. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 17, n. 3, p. 034514-034514, 2023 b. https://doi.org/10.1117/1.JRS.17.034514

DA SILVA, Sally Deborah Pereira et al. Modeling and detection of invasive trees using UAV image and machine learning in a subtropical forest in Brazil. **Ecological Informatics**, v. 74, p. 101989, 2023 a. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.101989

DA SILVA, Tiago van der Worp; GOMES PEREIRA, Luísa; OLIVEIRA, Bruna RF. Assessing Geometric and Radiometric Accuracy of DJI P4 MS Imagery Processed with Agisoft Metashape for Shrubland Mapping. **Remote Sensing**, v. 16, n. 24, p. 4633, 2024. https://doi.org/10.3390/rs16244633

DANIELS, Louis et al. Identifying the optimal radiometric calibration method for UAV-based multispectral imaging. **Remote Sensing**, v. 15, n. 11, p. 2909, 2023. https://doi.org/10.3390/rs15112909

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa -SPI; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2025. 6ª ed. 393p

EUGENIO, Fernando Coelho et al. Estimated flooded rice grain yield and nitrogen content in leaves based on RPAS images and machine learning. **Field Crops Research**, v. 292, p. 108823, 2023. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108823

GITELSON, Anatoly; MERZLYAK, Mark N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of Aesculus hippocastanum L. and Acer platanoides L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. **Journal of plant physiology**, v. 143, n. 3, p. 286-292, 1994. https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81633-0

HIJMANS, Robert J. et al. Package 'terra'. **Maintainer: Vienna, Austria**, v. 384, 2022. Disponível em: https://cran.r-project.org/web/packages/terra/index.html

MAES, Wouter H.; STEPPE, Kathy. Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. **Trends in plant science**, v. 24, n. 2, p. 152-164, 2019.

MAMAGHANI, Baabak; SALVAGGIO, Carl. Multispectral sensor calibration and characterization for sUAS remote sensing. **Sensors**, v. 19, n. 20, p. 4453, 2019. https://doi.org/10.3390/s19204453

MERZLYAK, Mark N. et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia plantarum**, v. 106, n. 1, p. 135-141, 1999. https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x

MicaSense. *Modelo de Calibração Radiométrica para Sensores MicaSense* ; MicaSense Inc.: Seattle, WA, EUA, 2022.

PEBESMA, Edzer. Simple features for R: standardized support for spatial vector data. 2018. Disponível em: https://cran.r-project.org/web/packages/sf/index.html

ISBN 978-65-990392-6-3

PELL, Taleatha; LI, Joan YQ; JOYCE, Karen E. Demystifying the differences between structure-from-MotionSoftware packages for pre-processing drone data. **Drones**, v. 6, n. 1, p. 24, 2022. https://doi.org/10.3390/drones6010024

Pix4D. **Correções radiométricas** ; JIYI Robotics Co.: Xangai, China, 2020.

RICHTER, Vinicius et al. UAV-based spectral images using remote sensing and YOLOv8 in Eucalyptus saligna Sm. inventory. **Ciência Florestal**, v. 35, p. e88522, 2025. https://doi.org/10.5902/1980509888522

ROUSE, J. W. et al. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. **NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md**, v. 371, 1974.

SMITH, Geoffrey M.; MILTON, Edward J. The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. **International Journal of remote sensing**, v. 20, n. 13, p. 2653-2662, 1999. https://doi.org/10.1080/014311699211994

SWAMINATHAN, Vaishali et al. Selection of appropriate multispectral camera exposure settings and radiometric calibration methods for applications in phenotyping and precision agriculture. **The Plant Phenome Journal**, v. 7, n. 1, p. e70000, 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.18553

WALKER, Samenth E.; SHEAVES, Marcus; WALTHAM, N. J. Barriers to using UAVs in conservation and environmental management: a systematic review. **Environmental Management**, v. 71, n. 5, p. 1052-1064, 2023. https://doi.org/10.1007/s00267-022-01768-8

WANG, Cuizhen. At-sensor radiometric correction of a multispectral camera (RedEdge) for sUAS vegetation mapping. **Sensors**, v. 21, n. 24, p. 8224, 2021. https://doi.org/10.3390/s21248224

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 52

IMPACTO DA CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA EM IMAGENS MULTIESPECTRAIS DO SENSOR PARROT SEQUOIA® EM ARROZ IRRIGADO

Impact of radiometric calibration on multispectral images from the Parrot Sequoia® sensor in flooded rice

Sally Deborah Pereira da Silva[1]; Álisson Pacheco Sperandei[1]; Vinicius Ritcher[1]; Roberta Aparecida Fantinel[2]; Lúcio de Paula Amaral[3]; Rudiney Soares Pereira[3]; Fernando Coelho Eugenio[4]

[1]PPGEF/UFSM, Avenida Roraima nº 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria - RS, Brasil. E-mail: sallydeborah@outlook.com; alissonsperandei@gmail.com; vinicius00rich@gmail.com

[2]PPGCF/UFES, *Campus* Jerônimo Monteiro, Avenida Governador Lindemberg, nº 316, CEP: 29550000, Jerônimo Monteiro - ES, Brasil. Email: fantinel.ar@gmail.com

[3]Departamento de Engenharia Rural, UFSM, Avenida Roraima nº 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria - RS, Brasil. E-mail: amaralufsm@gmail.com; rudiney.s.pereira@gmail.com

[4]Departamento de Agronomia - UFVJM - Rodovia MGT 367, Alto da Jacuba, CEP: 391000-000, Diamantina - MG, Brasil. E-mail: fernando.eugenio@ufvjm.edu.br

RESUMO

O trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da calibração radiométrica em imagens multiespectrais do sensor Parrot Sequoia® em áreas de arroz irrigado. Compararam-se dados calibrados e não calibrados quanto à precisão e consistência espectral. O estudo foi conduzido em área experimental de 21 ha do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), em Cachoeira do Sul (RS). As imagens foram adquiridas com sensor Parrot Sequoia® acoplado a um Phantom 4 Pro. Foram utilizadas quatro bandas espectrais: Green, Red, Rededge e NIR. Compararam-se dois fluxos de processamento: com e sem calibração radiométrica. A análise considerou quatro classes: arroz irrigado, água, solo exposto e outros usos. Aplicou-se o teste de Mann-Whitney para comparação dos dados. Os resultados mostraram inconsistências na banda Green no processo de calibração. Os valores de reflectância não corresponderam ao esperado para alguns alvos. Ainda assim, a calibração radiométrica mostrou-se essencial por garante maior confiabilidade e eficiência no uso de sensores multiespectrais.

Palavras-chave: Agricultura de precisão, Sensoriamento Remoto. Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas.

ABSTRACT

The study aimed to evaluate the effect of radiometric calibration on multispectral images from the Parrot Sequoia® sensor in irrigated rice areas. Calibrated and non-calibrated data were compared in terms of spectral accuracy and consistency. The study was conducted in a 21 ha experimental area of the Rio Grandense Rice Institute (IRGA), in Cachoeira do Sul (RS). Images were acquired using a Parrot Sequoia® camera mounted on a Phantom 4 Pro. Four spectral bands were used: Green, Red, Rededge, and NIR. Two processing workflows were compared: with and without radiometric calibration. The analysis considered four classes: irrigated rice, water, bare soil, and other uses. The Mann-Whitney test was applied to compare the data. The results showed inconsistencies in the Green band during the calibration process. Reflectance values did not correspond to the expected behavior for some targets. Nevertheless, radiometric calibration proved to be essential. It ensures greater reliability and efficiency in the use of multispectral sensors.

Keywords: Precision agriculture, Remote Sensing. Remotely Piloted Aircraft Systems.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os avanços no Sensoriamento Remoto (SR) e a crescente utilização de sensores acoplados às aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) têm ampliado significativamente o interesse científico em diversas áreas, especialmente na agricultura de precisão. Nesse cenário, as ARPs destacam-se por apresentarem vantagens em relação aos sistemas tradicionais de SR. Para Guimarães et al. (2020), essas plataformas oferecem versatilidade em sua utilização e possibilitam a aquisição de imagens com alta resolução espacial em escala regional e local. Eugenio et al. (2020) destaca que as ARPs aperfeiçoam o processo de obtenção de imagens, tornando-se uma ferramenta útil para a aquisição e complementação das imagens obtidas por sensores orbitais.

Entre as aplicações do SR, sobressai a aquisição de imagens multiespectrais de alta resolução por meio de ARP, onde a principal vantagem reside na elevada resolução espacial e espectral, que favorecem a classificação e a extração de informações espectrais (LU e HE, 2017). Nesse contexto, um dos sensores mais representativos é o Parrot Sequoia®, amplamente utilizado em estudos agrícolas por sua capacidade de capturar informações em diferentes bandas espectrais.

Apesar dessas vantagens, a aquisição de imagens por ARP ainda enfrenta limitações, sobretudo relacionadas às variações de iluminação durante o voo, condições ambientais e parâmetros da câmera, que podem causar alteração no brilho e na cor, que resultam em inconsistências nos resultados das análises, especialmente em estudos baseadas em características derivadas das imagens, como índices espectrais/vegetação (WANG et al., 2024; SWAMINATHAN et al., 2024). Olsson et al. (2021) destacam que as incertezas na reflectância dos painéis de calibração usados para derivar a equação do método da linha empírica influenciarão a precisão do método, assim como a qualidade e a sensibilidade do sensor usado para coletar os dados.

Para mitigar esses efeitos e assegurar maior consistência nos dados, a calibração radiométrica de imagens multiespectrais constitui uma etapa fundamental no SR, aplicada tanto a imagens orbitais e aéreas quanto às obtidas por meio de aquisições terrestres (PORTO et al., 2023). Moriya (2015) define a calibração radiométrica como um processo necessário para produzir imagens multiespectrais que forneçam informações de acordo com o referencial radiométrico conhecido e, portanto, comparável. O processo de calibração, envolve a conversão dos dados brutos, expressos em número digital (ND), em variáveis radiométricas de interesse, como a reflectância de superfície (OSCO et al., 2019).

Além disso, as correções associadas ao sensor incluem ajustes relacionados ao tempo de exposição e ao tamanho da abertura dos dispositivos para passagem de luz, os quais determinam a quantidade de luz incidente na câmera, bem como à sensibilidade do sensor de imagem, que afeta diretamente a relação entre a energia radiante captada e o ND registrado (ASSAMANN et al., 2018).

Diante do exposto, o estudo teve como objetivo avaliar o efeito da calibração radiométrica em imagens multiespectrais do sensor Parrot Sequoia® em áreas de arroz irrigado, comparando dados calibrados e não calibrados quanto à precisão e consistência espectral.

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque · cotrijal · UFSM

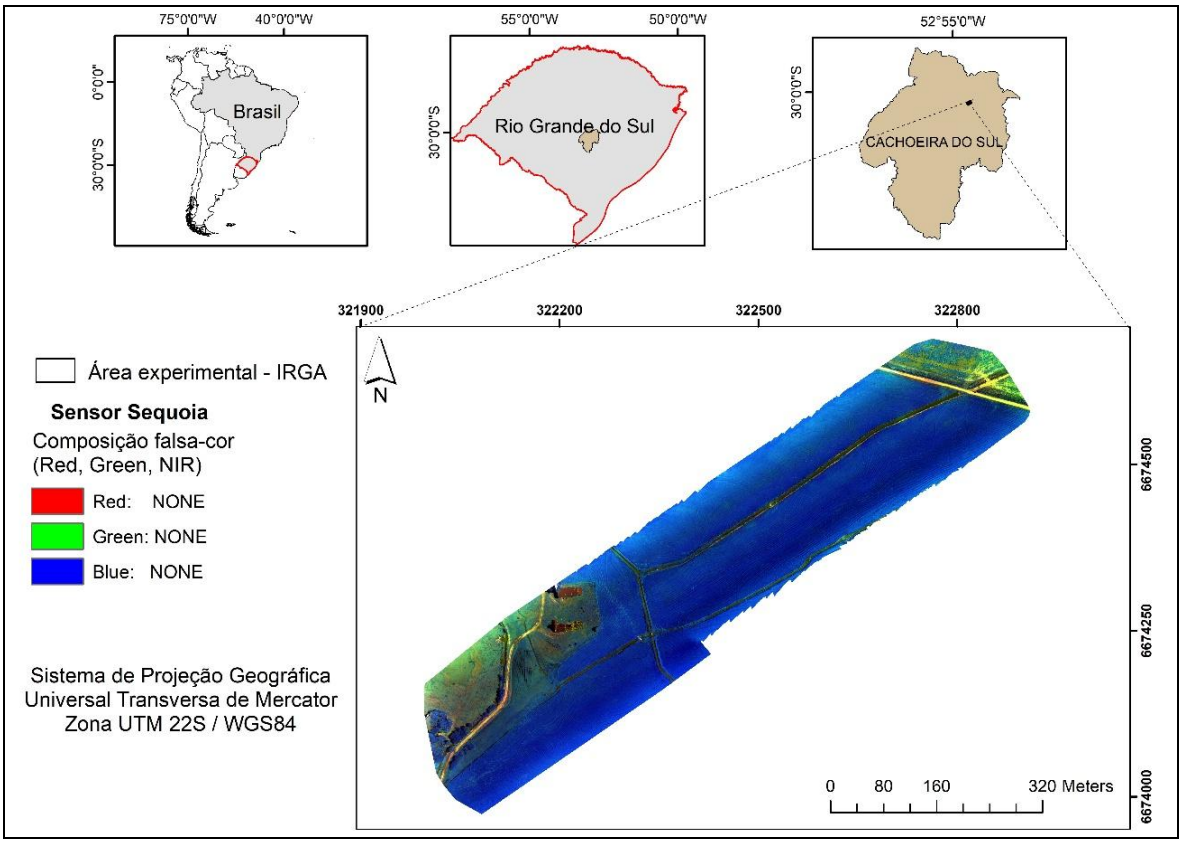
ISBN 978-65-990392-6-3

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido em uma área de 21 hectares na estação experimental do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), localizada a 30°13′26,0″S, 52°56′38,5″W (Fig. 1), no município de Cachoeira do Sul, região central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O clima local é classificado como subtropical úmido (Cfa), segundo Köppen, com temperatura média anual de 19,2 °C e precipitação total anual de 1.708 mm (ALVARES et al., 2013. O solo da área experimental foi identificado como Planossolo Háplico Eutrófico (EMBRAPA, 2025).

Figura 11 - Localização da área estudo na estação experimental do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), município de Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.



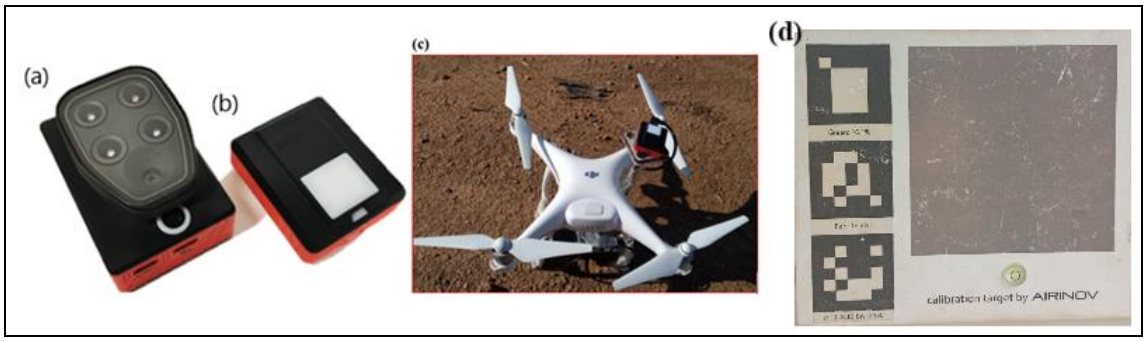
Fonte: Autores (2025).

2.2 *AQUISIÇÃO DE DADOS COM ARP*

Para obtenção das imagens, foi utilizado o sensor multiespectral Parrot Sequoia®, embarcado ao Phantom 4 Pro. O sensor Sequoia captura imagens em quatro bandas espectrais estreitas, sendo duas no espectro visível (*Green* e *Red*), uma na região da borda vermelha (*RedEdge*) e uma no infravermelho próximo (*Near Infrared* – NIR), com resolução espacial de 1,2 megapixel. Faz parte do sistema, o Sunshine Sensor®, acoplado à ARP e conectado à câmera, responsável por registrar dados auxiliares, como irradiância incidente, coordenadas geográficas e orientação do sensor, que são utilizados para a correção radiométrica e geolocalização das imagens, em tempo real (Figura 2).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2 - Representação da câmera Sequoia® (a); Sensor Sunshine (b); Detalhe da ARP Phantom® 4 Pro, equipada com a câmera multiespectral Sequoia®, integrada ao sistema Sunshine® (c); Painel de calibração do sensor sequoia® (d).



Fonte: Parrot sequoia (2017). Adaptado pelos autores (2025).

O campo de visão horizontal é de 61,9° enquanto o campo de visão vertical é de 48,5°. O tamanho da imagem é de 1280 × 960 pixels e as imagens foram salvas no formato *Raw* como arquivos *Tiff*. A câmera inclui um sensor de luz solar separado com um campo de visão hemisférico que mede a irradiação solar nas mesmas bandas espectrais dos quatro sensores de imagem. O sensor de luz solar inclui um receptor de Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS) e uma Unidade de Medição Inercial (IMU) para medir a posição e a orientação do sensor durante a captura de imagens (Parrot Sequoia, 2017). É importante ressaltar que, neste estudo, as imagens RGB não foram incluídas.

Os valores de albedo requeridos para a correção radiométrica foram obtidos por meio de um painel de calibração fornecido juntamente com o sensor Sequoia (*serial number* 002105). As especificações técnicas detalhadas do sensor estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Especificações técnicas do Sensor Parrot Sequoia® e do painel de calibração.

Parrot Sequoia®		**Sensor Sunshine®**	
Quatro bandas espectrais de 1,2 MP, obturador global com resolução radiométrica de 12 bits		Quatro sensores espectrais com os mesmos filtros da câmera	
Bandas espectrais	*Green* – 550 nm ± 40 nm	**Albedo do painel de calibração**	*Green* – 0,161
	Red – 660 nm ± 40 nm		*Red* – 0,196
	RedEdge – 735 nm ± 10 nm		*RedEdge* – 0,243
	NIR – 790 nm ± 40 nm		NIR – 0,339

A aquisição das imagens em campo foi realizada por meio de uma sequência de etapas: definição do plano de voo, testes e verificações da ARP, lançamento e pouso, visando dessa forma, garantir a qualidade dos dados obtidos das mesmas. O plano de voo foi realizado no aplicativo DroneDeploy®, com a configuração dos seguintes parâmetros operacionais: altitude de 70 m, velocidade de voo de 10 m/s, sobreposição lateral de 70% e sobreposição frontal de 80%. O voo e a aquisição das fotos foram realizados no dia 25 de março de 2020, no intervalo entre 10h30 e 11h00 am. O arroz irrigado encontrava-se no estádio fenológico de

ISBN 978-65-990392-6-3

maturação dos grãos, com semeadura em 25 de novembro de 2019 e colheita em 04 de junho de 2020.

2.3 PROCESSAMENTO DE DADOS

2.3.1 Geração dos ortomosaicos

As imagens multiespectrais foram obtidas a partir do cartão de memória da câmera Parrot Sequoia® e processadas por meio do software Pix4Dmapper, com o uso da rotina de processamento "*Agriculture Multispectral*". Inicialmente, foi realizado a correção das distorções geométricas das imagens, que considera os parâmetros internos e externos do sensor, e a identificação de pontos de correspondência entre as imagens. Essa etapa resultou na geração de uma nuvem de pontos esparsa, em posteriormente densificada. Posteriormente, foi gerado o modelo digital de superfície e, depois, realizada à ortorretificação das imagens, com a interpolação da nuvem de pontos combinada com os dados radiométricos registrados, que resultaram na produção dos ortomosaicos multiespectrais finais.

Para cada banda espectral capturada (*Green*, *Red*, *RedEdge* e NIR), foram gerados ortomosaicos individuais no formato *GeoTIFF*. O processamento incluiu a aplicação da calibração radiométrica, que consistiu na correção dos valores digitais com base na irradiância incidente registrada pelo Sensor Sunshine e nos valores de albedo do painel de calibração da própria câmera. A resolução espacial final (*Ground Sample Distance* - GSD) dos produtos foi de 8,35 cm/pixel.

Para avaliar os efeitos da calibração radiométrica sobre os dados processados, adotaram-se dois fluxos distintos de processamento:

(i) Com calibração radiométrica, com o uso dos dados de irradiância e albedo mencionados;

(ii) Sem calibração radiométrica, via processamento dos valores digitais originais das imagens (brutos).

Ao final de cada fluxo, as bandas espectrais foram exportadas individualmente em formato *GeoTIFF*, tanto para os dados calibrados quanto para os não calibrados. Esses produtos constituíram a base para a coleta de amostras e a análise comparativa entre os dois conjuntos de dados.

2.3.2 Amostragem e extração de estatísticas zonais

Com base na análise preliminar da área de estudo, foram definidas quatro classes de interesse: arroz irrigado, água, solo exposto e outros usos, sendo coletadas 50 amostras para cada uma delas. No *software* ArcMap (versão 10.1), *shapefiles* com pontos georreferenciados foram digitalizados diretamente sobre os mosaicos, com base na inspeção visual do ortomosaico falsa-cor, que garantiu a correspondência espacial com os alvos. Em torno dos pontos, foram gerados *buffers* circulares de 50 cm de raio, utilizados como regiões de amostragem para extrair os valores das quatro bandas espectrais, tanto para dados calibrados quanto para os não calibrados. A extração das estatísticas zonais (média, mediana, mínimo e máximo) foi realizada com a função "*extract ()*" da biblioteca terra em ambiente *Rstudio*, que resultou em tabelas com identificadores únicos para cada amostra.

ISBN 978-65-990392-6-3

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística foi realizada para comparar os valores das bandas *Green*, *Red*, *RedEdge* e NIR, obtidos com e sem calibração radiométrica, separadamente para as classes de interesse pré-definidas, ou seja, arroz irrigado, água, solo exposto e outros usos.

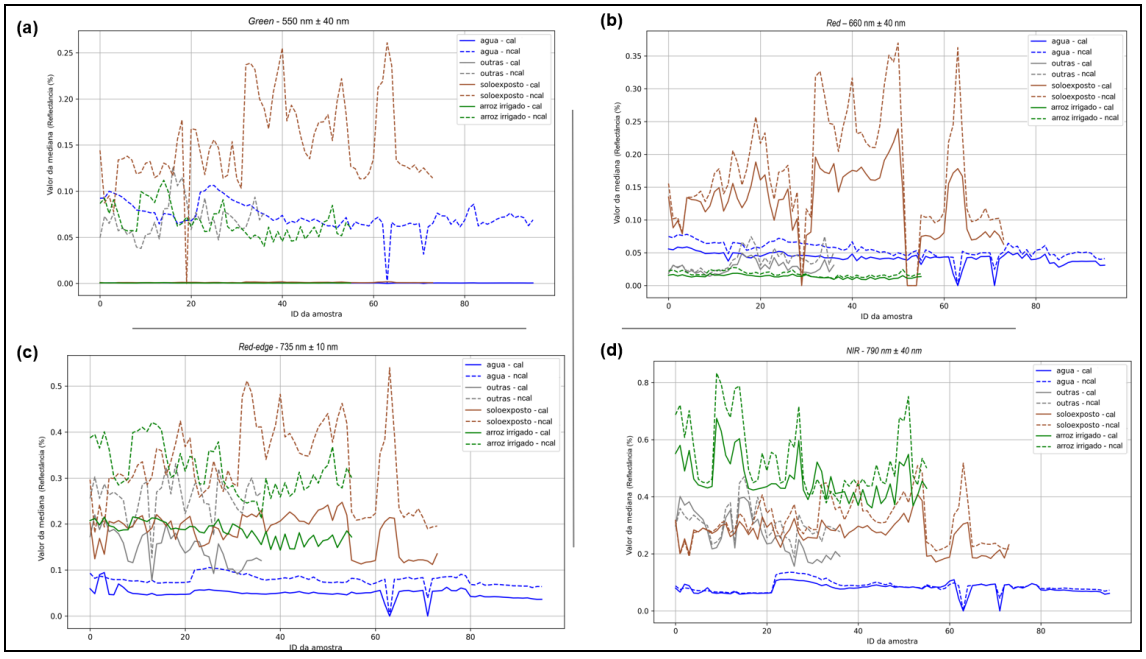
Inicialmente, os dados foram submetidos ao teste de normalidade Shapiro-Wilk, com nível de significância de 5% (p > 0,05). Em seguida, realizou-se a estatística descritiva por grupo, com obtenção da média, mediana, desvio padrão (DP), valores mínimos, valores máximo e coeficiente de variação (CV%).

Como os dados não atenderam aos critérios de normalidade, aplicou-se o teste de Mann-Whitney (U de Wilcoxon) para comparar as distribuições entre as condições com e sem calibração, para cada banda e classe. Todas as análises foram conduzidas em ambiente *Rstudio* versão 4.4.1.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos dados multiespectrais apresentou diferenças no comportamento das quatro classes de interesse, quando comparados os resultados obtidos com e sem calibração radiométrica (Figura 3).

Figura 3 - Curvas de reflectância média das classes de uso e cobertura (água, solo exposto, outras culturas e arroz irrigado), obtidas em quatro bandas espectrais: (a) *Green*; (b) *Red*; (c) *RedEdge*; e (d) NIR.



Onde: *cal:* bandas com calibração radiométrica; *ncal:* bandas sem calibração radiométrica. Fonte: Autores (2025).

No caso da água, a reflexão calibrada tende a valores próximos de zero, em especial no NIR, comportamento condizente com sua forte absorção da radiação eletromagnética (REM), principalmente no NIR; sem calibração, tais valores podem se elevar artificialmente, comprometendo a separabilidade entre água e alvos de baixa reflectância. Swaminathan et al. (2024) verificaram que o uso de exposição fixa, em comparação ao padrão de autoexposição,

ISBN 978-65-990392-6-3

melhorou a precisão radiométrica das imagens do sensor *RedEdge*-3 (MAPE <5 %), com redução ruído e oscilações na reflectância solo-vegetação.

Para o solo exposto, a calibração garante padrões estáveis de reflectância, com incremento do visível ao NIR, que corrobora o comportamento espectral do solo. Em contraste, dados não calibrados exibem dispersão elevada, especialmente nas bandas *Red* e *RedEdge*. Holman et al. (2019) ao avaliarem a aplicabilidade de imagens baseadas em ARP de altíssima resolução espacial (1 cm) obtidas com câmeras digitais comerciais prontas para uso (COTS) para derivar imagens de reflectância calibradas, relatam que COTS sem calibração adequada resultam em sobreposição entre vegetação e solo, que reduz a precisão de índices como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index)*.

No caso da banda *Green* (Fig. 3 – a), observou-se que os dados calibrados da vegetação apresentaram valores próximos de zero, comportamento atípico quando comparado ao padrão esperado para dosséis fotossinteticamente ativos, que normalmente exibem um pico de reflectância nessa região, quando comparados a banda do *Red* e *Blue* (PONZONI et al., 2012). Esse resultado sugere que a calibração aplicada reduziu de forma excessiva os valores na banda *Green*, possivelmente devido a ajustes inadequados de fatores de iluminação, ou erros no processo de correção radiométrica, como já reportado em outros estudos com sensores multiespectrais embarcados em ARP (HOLMAN et al., 2019; OLSSON et al., 2021).

Enquanto os dados não calibrados mantiveram valores mais elevados nessa faixa espectral, ainda que com maior ruído e dispersão, os valores calibrados comprimiram-se em torno de zero, que ocultam diferenças reais entre culturas distintas. Isso pode comprometer a detecção de variações no vigor vegetativo por índices que dependem do verde, como o GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*) ou o VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*). Swaminathan et al. (2024) destacam que a escolha do método de calibração (uso de painéis, exposição fixa e ajustes atmosféricos) é determinante para evitar distorções espectrais, especialmente em bandas sensíveis à variabilidade do dossel.

A Tabela 1 mostra a estatística descritiva das reflectâncias calibradas para as diferentes classes de interesse e bandas espectrais avaliadas. Observa-se que, na banda ***Green***, após a calibração radiométrica, os valores parecem incorretos, significativamente inferiores ao esperado para vegetação e solos expostos. Esse resultado sugere a ocorrência de um erro sistemático, que não deveria ter ocorrido e que, atualmente, inviabiliza qualquer tentativa de correção retroativa. Entre as possíveis causas, destacam-se: variações de iluminação e condições ambientais no momento da aquisição das imagens, falhas no aquecimento ou estabilidade do sensor durante o voo, inconsistências ou mal funcionamento do Sensor Sunshine, possíveis danos ou sujeira no painel de calibração, ou ainda inconsistências no software de processamento, como a aplicação incorreta dos fatores de conversão para esta banda.

A banda *Red* apresentou valores intermediários, com destaque para solo exposto (0,132), refletindo a menor absorção de radiação nesta faixa por alvos sem biomassa ativa. Na banda RedEdge, os maiores valores médios foram observados em arroz irrigado (0,184), possivelmente associada à sua sensibilidade ao vigor vegetativo (BARNES et al., 2000) e solo exposto (0,182). Para a banda do NIR, observou-se comportamento distinto entre as classes analisadas. Os maiores valores médios foram registrados em arroz irrigado (0,461), seguido de solo exposto (0,263) e outros usos (0,268). Entretanto, o valor elevado para o arroz irrigado deve ser interpretado com cautela, uma vez que essa classe está associada à presença de lâmina d'água na área do estudo, que tipicamente reduz a reflectância no NIR. Nesse sentido, os resultados sugerem que a resposta espectral registrada pode refletir uma mistura entre a vegetação emergente e a água, com o plano de fundo.

ISBN 978-65-990392-6-3

Quanto a variabilidade, destacam-se os maiores CV em solo exposto (32,96% na banda *Red*) e outros usos (33,26% na banda *Red*), que indicam elevada heterogeneidade espectral desses alvos. Em contrapartida, os menores valores de CV% foram observados na banda *RedEdge* do arroz irrigado (10,98%), que sugerem maior homogeneidade nesse contexto.

Tabela 4 - Estatística descritiva para as bandas espectrais do sensor Parrot Sequoia® com calibração radiométrica, das quatro classes analisadas.

Classes	Banda	Média	Mediana	DP	Min	Max	CV (%)
Arroz irrigado	*Green*	0,00046	0,00043	0,00012	0,00028	0,00078	25,78
Arroz irrigado	*Red*	0,014	0,014	0,003	0,009	0,019	18,54
Arroz irrigado	*RedEdge*	0,184	0,187	0,020	0,143	0,216	10,98
Arroz irrigado	NIR	0,461	0,436	0,073	0,361	0,675	15,77
Água	*Green*	0,00051	0,00049	0,00009	0,00023	0,00074	17,90
Água	*Red*	0,043	0,044	0,007	0,018	0,059	16,31
Água	*RedEdge*	0,050	0,049	0,009	0,026	0,095	18,61
Água	NIR	0,080	0,080	0,010	0,062	0,106	12,55
Solo exposto	*Green*	0,001	0,001	0,000	0,001	0,002	27,28
Solo exposto	*Red*	0,132	0,132	0,044	0,063	0,239	32,96
Solo exposto	*RedEdge*	0,182	0,197	0,039	0,112	0,241	21,44
Solo exposto	NIR	0,263	0,276	0,045	0,172	0,342	17,28
Outros usos	*Green*	0,00048	0,00047	0,00013	0,00026	0,00088	27,57
Outros usos	*Red*	0,027	0,025	0,009	0,014	0,050	33,26
Outros usos	*RedEdge*	0,148	0,154	0,036	0,077	0,220	24,10
Outros usos	NIR	0,268	0,253	0,076	0,157	0,401	28,50

Fonte: Autores (2025).

A Tabela 2 mostra a estatística descritiva das reflectâncias registradas pelo sensor Parrot Sequoia® sem calibração radiométrica, para as quatro classes analisadas. Na banda *Green*, os valores médios variaram de 0,067 (arroz irrigado) a 0,149 (solo exposto), com maior variabilidade nesta última classe (CV = 30,59%), possivelmente atribuída à heterogeneidade dos alvos e à presença de pixels mistos. Na classe água, o valor médio foi de 0,074, compatível com a baixa reflectância esperada para esse alvo nessa banda espectral (PONZONI et al., 2012).

Na banda *Red*, os valores médios variaram de 0,018 a 0,183, com maior variabilidade observada em solo exposto (CV = 42,28%) e em outros usos (CV = 39,88%), possivelmente relacionada à sensibilidade dessa faixa espectral às diferenças de cobertura e às condições do solo. Para a banda *RedEdge*, os maiores valores foram observados em arroz irrigado (0,319) e

ISBN 978-65-990392-6-3

solo exposto (0,322), enquanto em água e outros usos os valores foram mais baixos (0,080 e 0,260, respectivamente). A variabilidade foi moderada, com destaque para solo exposto (CV = 26,87%). Na banda do NIR, o arroz irrigado apresentou o maior valor médio (0,536), seguido de outros usos (0,308) e solo exposto (0,309). O valor observado para o arroz irrigado deve ser interpretado considerando a presença de lâmina d'água nas áreas do plantio, que normalmente reduz a reflectância nessa faixa, nesse caso, a média elevada provavelmente reflete a contribuição da vegetação emergente e da mistura espectral com a água (PONZONI et al., 2012). Em contrapartida, a classe água apresentou a menor média (0,087), em consonância com o forte efeito de absorção da radiação nessa faixa espectral (DORON et al., 2011).

De forma geral, os resultados indicaram que, mesmo sem calibração radiométrica, as reflectâncias seguem o comportamento espectral esperado para os diferentes alvos. No entanto, apresentam maior variabilidade e valores médios mais elevados em todas as bandas quando comparados às calibradas. Esses resultados, ressaltam a importância da calibração radiométrica para a comparabilidade entre bandas e classes, além de reduzir efeitos de variações de iluminação e da heterogeneidade na aquisição das imagens.

Tabela 5 - Estatística descritiva para as bandas espectrais do sensor Parrot Sequoia® sem calibração radiométrica, das quatro classes analisadas.

Classes	Banda	Média	Mediana	DP	Min	Max	CV (%)
Arroz irrigado	*Green*	0,067	0,061	0,017	0,040	0,112	25,70
Arroz irrigado	*Red*	0,018	0,017	0,004	0,010	0,027	23,63
Arroz irrigado	*RedEdge*	0,319	0,302	0,053	0,212	0,421	16,68
Arroz irrigado	NIR	0,536	0,473	0,123	0,377	0,834	23,01
Água	*Green*	0,074	0,071	0,012	0,059	0,106	16,09
Água	*Red*	0,056	0,054	0,010	0,038	0,078	17,33
Água	*RedEdge*	0,080	0,080	0,010	0,062	0,106	12,59
Água	NIR	0,087	0,085	0,018	0,062	0,136	21,12
Solo exposto	*Green*	0,149	0,135	0,046	0,000	0,261	30,59
Solo exposto	*Red*	0,183	0,172	0,077	0,069	0,370	42,28
Solo exposto	*RedEdge*	0,322	0,308	0,086	0,181	0,540	26,87
Solo exposto	NIR	0,309	0,310	0,070	0,190	0,518	22,59
Outros usos	*Green*	0,070	0,068	0,019	0,038	0,126	27,75
Outros usos	*Red*	0,038	0,033	0,015	0,018	0,075	39,88
Outros usos	*RedEdge*	0,260	0,265	0,041	0,127	0,331	15,80
Outros usos	NIR	0,308	0,299	0,060	0,188	0,470	19,55

Fonte: Autores (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

Os resultados indicam que o comportamento espectral dos alvos nas bandas *Red*, *RedEdge* e NIR está em conformidade com o observado na literatura para vegetação, solos e corpos d'água (JENSEN, 2009). Por outro lado, a banda *Green* apresentou discrepâncias relevantes após a calibração radiométrica, que sugerem inconsistências no processo de correção ou alguma condição do painel de calibração que interfira na sua capacidade de refletir a energia incidente. Na banda *Green* (~550 nm), a literatura aponta a ocorrência de um pico de reflectância na vegetação, associado à baixa absorção de clorofilas nesta faixa (JENSEN, 2009; PONZONI et al., 2012). Esse padrão foi observado nos dados não calibrados, com valores médios entre 0,06 e 0,15 em arroz irrigado, solo exposto e outros usos. Entretanto, nos dados calibrados, os valores da banda *Green* foram drasticamente reduzidos para aproximadamente 0,0005 em todas as classes analisadas, que sugerem um possível erro na calibração dessa banda, uma vez que o solo exposto, que deveria apresentar reflectância significativa, registrou valores próximos de zero.

No que diz respeito a banda *Red,* os resultados confirmam a forte absorção pela clorofila. Tanto nos dados calibrados quanto não calibrados, arroz irrigado e água apresentaram valores baixos, enquanto o solo exposto apresentou valores mais altos, condizentes com a ausência de absorção específica neste alvo (TIRUNEH et al., 2022). Já na banda *RedEdge*, que corresponde à transição abrupta entre a absorção no vermelho e o platô de reflectância na banda NIR, é altamente sensível ao conteúdo de clorofila e ao estado fisiológico da vegetação (GITELSON et al., 1994). Esse comportamento foi observado pelos valores elevados no arroz irrigado, que refletem a atividade fotossintética da cultura, e pelos valores baixos na classe água, onde aparentemente não há biomassa verde. O solo exposto apresentou valores intermediários, coerentes com a ausência de pigmentos fotossintetizantes, mas com reflectância crescente nessa região do espectro.

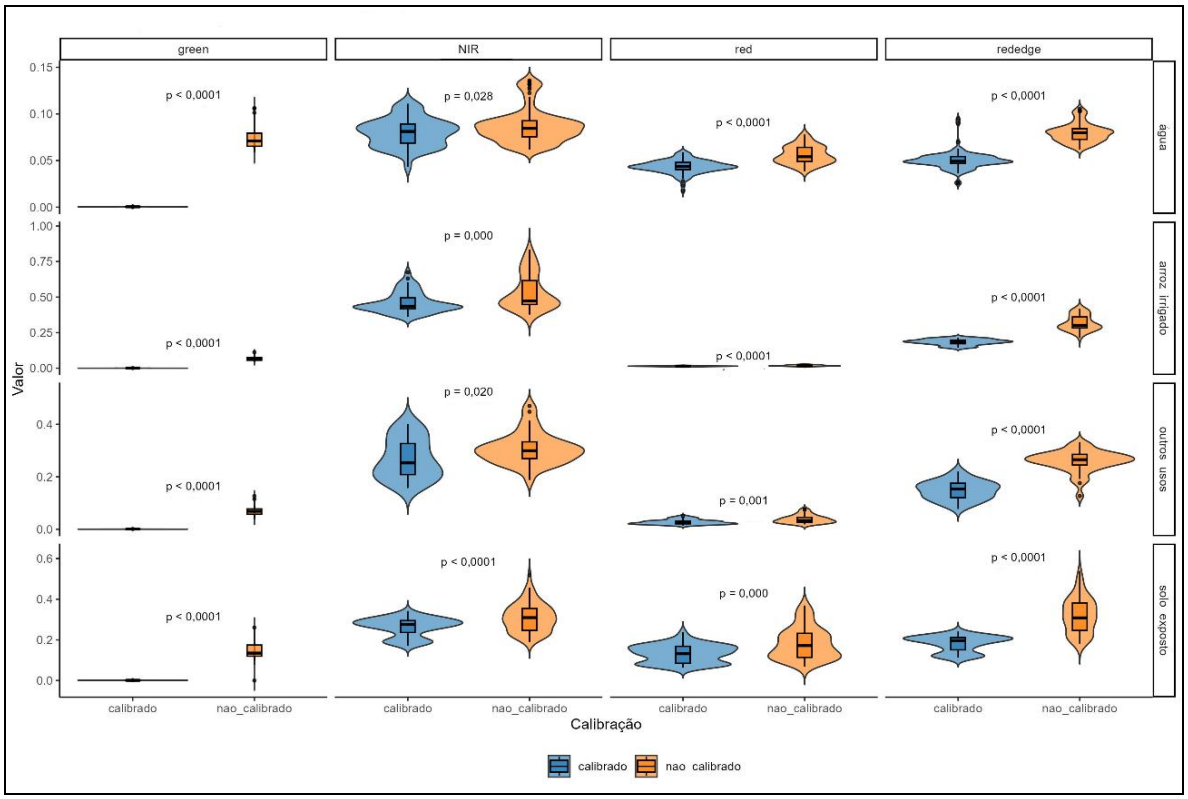
Na banda NIR, a vegetação saudável apresenta alta reflectância devido ao espalhamento na estrutura interna do mesófilo foliar, enquanto corpos d'água exibem absorção quase total (PONZONI et al., 2012). Nos dados analisados, a água apresentou os menores valores, confirmando esse padrão. O NIR é altamente sensível à composição foliar e ao conteúdo de água, devido à forte reflectância observada nos tecidos vegetais (GARCIA et al., 2025).

Os testes de comparação entre reflectâncias calibradas e não calibradas evidenciaram diferenças estatisticamente significativas em todas as bandas e classes analisadas ($p < 0,001$), conforme teste de Mann-Whitney (Figura 4). As maiores discrepâncias ocorreram na banda Green, em que os valores calibrados foram reduzidos a ordens de grandeza próximas de zero em todas as classes. Os valores calibrados apresentaram menor dispersão do que os não calibrados, resultados esses que sugerem que a calibração reduz a variabilidade e proporciona valores mais consistentes, que reforçam a importância de processos de calibração em análises que envolvem dados espectrais.

O estudo de Olsson et al. (2021), demonstra que múltiplos fatores técnicos interferem diretamente na qualidade da calibração em câmeras multiespectrais, como a Parrot Sequoia®, que incluem a influência da temperatura do sensor, condições atmosféricas e a orientação do sensor de irradiância (*Sunshine Sensor*). Esses fatores podem distorcer a transformação de ND em reflectância física. Especificamente, a instabilidade da sensibilidade do sensor, caso não seja estabilizada (por exemplo, permitir o aquecimento prévio da câmera), ou vieses no painel de calibração (como tamanho insuficiente ou reflectância imprecisa), podem levar à subestimação em bandas onde a vegetação deveria refletir significativamente, como o verde. Além disso, o ruído introduzido pela orientação e variabilidade do sensor de irradiância pode comprometer a normalização da irradiância em condições de luz variável, que resultaram em artefatos que justifiquem o valor próximo de zero observado.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 4 - Resultados do teste U de Mann-Whitney para comparação das bandas espectrais do sensor Parrot Sequoia® obtidos com e sem calibração radiométrica, nas quatro classes analisadas.



Fonte: Autores (2025).

Os resultados corroboram a literatura ao demonstrar que a calibração radiométrica é uma etapa imprescindível na utilização de sensores multiespectrais embarcado em ARP (Olsson et al., 2021; Swaminathan et al., 2024). Todavia, os valores atípicos observados na banda *Green* evidenciam a necessidade de protocolos de calibração mais rigorosos, incluindo validação com espectrorradiômetros de campo. Ademais, realizar calibrações periódicas do sensor e o uso de painel de calibração integro, para garantir a efetividade do registro de dados e de sua correção. Essas medidas são fundamentais para evitar viés espectral que comprometa análises temporais e uso de índices espectrais, para assegurar a integridade dos produtos derivados do sensoriamento remoto utilizados em processo de tomada de decisão.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou que a calibração radiométrica em imagens multiespectrais obtidas por sensores embarcados em ARP exerce influência significativa sobre os valores das bandas espectrais em diferentes alvos de uso e ocupação do solo. As análises estatísticas evidenciaram diferenças relevantes entre os dados calibrados e não calibrados em todas as classes de interesse, o que reforça a necessidade desse procedimento para assegurar consistência e precisão na interpretação espectral.

Destaca-se, ainda, que o uso adequado de painéis de calibração em boas condições e a correta utilização dos sensores de luz incidente, aliados a fluxos robustos de pré-processamento em softwares especializados, como o Pix4D, são fundamentais para garantir a

ISBN 978-65-990392-6-3

qualidade dos resultados. A ausência desses cuidados pode gerar distorções, como observado na banda *Green* durante o processo de calibração, que podem comprometer a interpretação dos dados e, consequentemente, a tomada de decisão.

Diante disso, recomenda-se a adoção sistemática de processos de calibração radiométrica em imagens multiespectrais obtidas por sensores embarcados em ARP aplicados à agricultura de precisão. Tal prática assegura maior confiabilidade e consistência dos dados espectrais e fortalecem a aplicação dessas tecnologias no monitoramento de culturas e no manejo dos recursos naturais.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria (PPGEF/UFSM). Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Espírito Santo (PPGCFL/UFES), *Campus* Jerônimo Monteiro. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ASSMANN, J. J.; et al. Vegetation monitoring using multispectral sensors-Best practices and lessons learned from high latitudes. **J. Unmanned Veh. Syst**. 2018, 7, 54–75.

BARNES, E. M.; et al. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. In: **Proceedings of the fifth international conference on precision agriculture, Bloomington, MN, USA**. 2000. p. 6.

DORON, M.; et al. Spectral variations in the near-infrared ocean reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 7, p. 1617-1631, 2011.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa -SPI; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2025. 6ª ed. 393 p.

EUGENIO, F. C.; et al. Remotely piloted aircraft systems and forests: a global state of the art and future challenges. **Canadian Journal of Forest Research**. Res. **00**: p. 1–12, 2020.

GARCIA, A. D. B.; et al. Irrigated rice-field mapping in Brazil using phenological stage information and optical and microwave remote sensing. **Applied Computing and Geosciences**, v. 25, p. 100223, 2025.

GITELSON, A.; MERZLYAK, M. N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of Aesculus hippocastanum L. and Acer platanoides L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. **Journal of plant physiology**, v. 143, n. 3, p. 286-292, 1994.

GUIMARÃES, N.; et al. Forestry Remote Sensing from Unmanned Aerial Vehicles: A Review Focusing on the Data, Processing and Potentialities. **Remote Sensing**, v. 12, n. 6, p. 1046, 2020.

HOLMAN, F. H.; et al. Radiometric calibration of 'commercial off the shelf'cameras for UAV-based high-resolution temporal crop phenotyping of reflectance and NDVI. **Remote Sensing**, v. 11, n. 14, p. 1657, 2019.

JENSEN, R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

LU, B.; HE, Y. Species classification using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 128, p. 73-85, 2017.

MOROIYA, E. A. S. **Identificação de bandas espectrais para detecção de cultura de cana-de-açúcar sadia e doente utilizando câmara hiperespectral embarcada em VANT**. 2015. 147p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas). Universidade Estadual Paulista – UNESP, Presidente Prudente – SP, 2015.

OLSSON, P.; et al. Radiometric correction of multispectral uas images: Evaluating the accuracy of the parrot sequoia camera and sunshine sensor. **Remote Sensing**, v. 13, n. 4, p. 577, 2021.

OLSSON, P.; et al. Radiometric correction of multispectral uas images: Evaluating the accuracy of the parrot sequoia camera and sunshine sensor. **Remote Sensing**, v. 13, n. 4, p. 577, 2021.

OSCO, L. P.; et al. Fluxo de Trabalho para a Calibração de Imagens Espectrais Obtidas em Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) pelo Método da Linha Empírica. **Anuário do Instituto de Geociências**. v. 42, p. 291-300, 2019.

PARROT SEQUOIA. **User guid**. Drones Parrot SAS, 2017. Disponível em: www.parrot.com/assets/s3fs-public/2021-09/sequoia-userguide-en-fr-es-de-it-pt-ar-zn-zh-jp-ko_0.pdf

PARROT SEQUOIA. Parrot Store Official. Available online: https://www.parrot.com/business-solutions-uk/parrot-professional/parrot-sequoia (acesso em 25 de agosto de 2025).

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed., 160 p. São Paulo: Oficina de Textos, 2012

PORTO, L. R.; BERVEGLIERI, A.; IMAI, N. N. Calibração radiométrica em imagens multiespectrais aéreas utilizando linha empírica e placa colorimétrica. **Anais** do XX simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, p. 2993-2997, 2023.

SWAMINATHAN, V.; et al. Selection of appropriate multispectral camera exposure settings and radiometric calibration methods for applications in phenotyping and precision agriculture. **The Plant Phenome Journal**, v. 7, n. 1, p. e70000, 2024.

SWAMINATHAN, V.; et al. Radiometric calibration of UAV multispectral images under changing illumination conditions with a downwelling light sensor. **The Plant Phenome Journal**, v. 7, n. 1, p. e70005, 2024.

ISBN 978-65-990392-6-3

SWAMINATHAN, V.; et al. Selection of appropriate multispectral camera exposure settings and radiometric calibration methods for applications in phenotyping and precision agriculture. **The Plant Phenome Journal**, v. 7, n. 1, p. e70000, 2024.

TIRUNEH, G. A.; et al. Use of soil spectral reflectance to estimate texture and fertility affected by land management practices in Ethiopian tropical highland. **PLoS One**, v. 17, n. 7, p. e0270629, 2022.

WANG, Y.; et al. UAV multispectral remote sensing for agriculture: A comparative study of radiometric correction methods under varying illumination conditions. **Biosystems Engineering,** v. 248, p. 240-254, 2024.



ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 53

QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE NABO E ERVILHACA SEMEADOS COM DRONE

PHYSIOLOGICAL QUALITY OF RADISH AND VETCH SEEDS SOWN BY DRONE

Luís Felipe Albarello[1], Gilvan Moisés Bertollo[1], Henrique Thomazi Bueno[1], Ezequiel Zibetti Fornari[2], Stela Maris Kulczynski[1], Nicolas Pancieira Cabral[1], Renan Mariotti[1], Guilherme Natalli Farias[1]

[1] Universidade Federal de Santa Maria campus Frederico Westphalen, Linha 7 de setembro, s/n, BR 386, km 40, 98400-000, Frederico Westphalen – RS, Brasil, luis.albarello@acad.ufsm.br, gilvan.bertollo@ufsm.br, henrique.thomazi@acad.ufsm.br, stela.kulczynski@ufsm.br, nicolas.cabral@acad.ufsm.br, renan.mariotti@acad.ufsm.br, guilherme.natalli@acad.ufsm.br. 4 CESURG: Rod. Leonel de Moura Brizola - BR-386, Km 138, s/n - Beira Campo, Sarandi - RS, 99560-000, Brasil, ezequiel.fornari@yahoo.com.br

RESUMO

A semeadura com drone é uma inovação promissora na agricultura, mas levanta preocupações quanto a possíveis danos mecânicos às sementes. Este estudo avaliou o impacto da semeadura a lanço com o drone DJI T40 referente as sementes de nabo (*Raphanussativus)* e ervilhaca (*Vicia sativa*). Foram testadas diferentes rotações do dispersor de sólidos (200 a 1300 rpm), com análises de germinação, biomassa, comprimento radicular e da parte aérea. Os resultados indicam que rotações mais baixas (200 e 475 rpm) proporcionam melhores taxas de germinação e desenvolvimento, com 200 rpm apresentando 91% e 475 rpm 88%, evidenciando menor dano mecânico. A pesquisa reforça a importância da calibração dos parâmetros operacionais para garantir eficiência e sustentabilidade no uso de drones para semeadura.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. Semeadura Aérea. Plantas de Cobertura.

ABSTRACT

Drone seeding is a promising innovation in agriculture, though it raises concerns about mechanical damage to seeds. This study evaluated the impact of drone broadcasting using the DJI T40 on radish (Raphanus sativus) and vetch (Vicia sativa) seeds. Various solid tank rotor speeds (200 to 1300 rpm) were tested, analyzing germination, biomass, root and shoot length. Results showed that lower speeds (200 and 475 rpm) led to better germination and development rates, with 200 rpm showing 91% and 475 rpm 88%, indicating reduced mechanical damage. The findings underscore the importance of adjusting operational parameters to ensure efficiency and sustainability in drone-based seeding.

Keywords: Precision Agriculture. Aerial Seeding. Cover Crops.

ISBN 978-65-990392-6-3

1.INTRODUÇÃO

A adoção de tecnologias avançadas na agricultura tem sido impulsionada pela busca por maior eficiência e produtividade. Entre as inovações mais recentes, o uso de drones se destaca, especialmente na semeadura de plantas de cobertura, como o nabo (*Raphanussativus*) e a ervilhaca *(Vicia sativa)*. A semeadura a lanço com drones tem se mostrado uma prática promissora, devido à sua capacidade de otimizar o plantio e reduzir custos operacionais (CURADO et al., 2013). No entanto, essa técnica apresenta um desafio significativo: o potencial de danos mecânicos às sementes, que podem comprometer a germinação e o vigor das plântulas, ou seja, o estágio inicial de desenvolvimento da planta após a germinação.

As plantas de cobertura são essenciais para a sustentabilidade agrícola, pois melhoram as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, além de auxiliar na ciclagem de nutrientes e no controle da erosão (CURADO et al., 2013). Nessa perspectiva, o sucesso dessas práticas depende diretamente da qualidade das sementes utilizadas e de sua capacidade de se estabelecer de forma uniforme e vigorosa.

Segundo Mendes et al. (2020), danos mecânicos em sementes de plantas de cobertura, resultantes de métodos de semeadura inadequados podem levar a uma implantação ineficiente da lavoura, especialmente em semeaduras a lanço. Nesse contexto, a literatura sugere que o impacto físico durante a semeadura, inclusive por meio de drones, pode causar microfissuras e fraturas nas sementes, os quais podem diminuir a taxa de germinação e a qualidade das plântulas. Ainda, pesquisas anteriores, como as de Souza et al. (2021), indicam que a severidade do dano está relacionada tanto ao tipo de equipamento quanto às características físicas da semente, como seu tamanho e a resistência do tegumento, que é a camada externa que protege a semente.

O presente trabalho tem como objetivo principal investigar a qualidade fisiológica, taxa de germinação e vigor das sementes de nabo e ervilhaca após a semeadura a lanço com drones. A pesquisa busca identificar os fatores que afetam a integridade das sementes e, consequentemente, maximizar a eficácia das plantas de cobertura no manejo sustentável do solo.

2.MATERIAIS E MÉTODOS

Este experimento foi conduzido na área experimental da Universidade Federal de Santa Maria, campus Frederico Westphalen (UFSM-FW), no Rio Grande do Sul, Brasil. O estudo foi realizado em condições controladas no laboratório de sementes da faculdade, para analisar o vigor de sementes de nabo e ervilhaca que foram submetidas à semeadura a lanço com o drone DJI T40, avaliando a influência desse método na qualidade fisiológica da semente.

O experimento utilizou diferentes rotações do dispersor de sólidos do drone: 200 rpm, 475 rpm, 750 rpm, 1025 rpm e 1300 rpm, além de um grupo testemunha não exposto à dispersão. Após cada aplicação, as sementes foram recolhidas e analisadas em laboratório na UFSM-FW. Para o teste de germinação e vigor, as sementes de nabo e ervilhaca foram submetidas ao método em papel germiteste, no qual é um papel filtro especial que absorve

ISBN 978-65-990392-6-3

água criando um ambiente controlado. Cinquenta sementes de cada amostra de tratamento foram escolhidas aleatoriamente para cada repetição.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), constituído por seis tratamentos (testemunha e rotações de 200, 475, 750, 1025 e 1300 rpm), com repetições de 50 sementes cada.

As variáveis avaliadas foram a germinação (%), plântulas anormais (%), sementes inviáveis (%) e comprimento da parte aérea e da raiz (cm). A germinação foi determinada em duas contagens: para o nabo, no 4º e 10º dias; para a ervilhaca, no 5º e 14º dias. Em cada contagem, as sementes foram classificadas em plântulas normais, plântulas anormais, sementes mortas e sementes não germinadas, de acordo com as normas RAS (2009). O comprimento da raiz e da parte aérea foi obtido a partir de dez plântulas normais selecionadas por repetição, medidas com régua milimetrada.

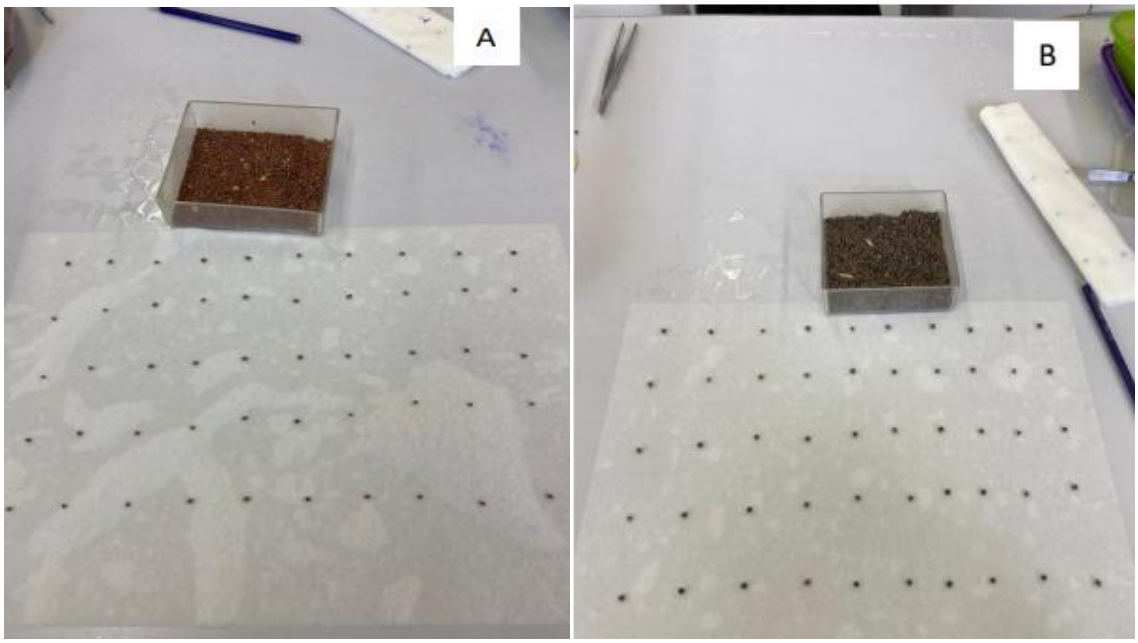
Figura 1. Ilustração do experimento e do Drone DJI T40.



Fonte: Resultado da pesquisa (2024).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2. Teste de germinação de sementes de nabo e ervilhaca em papel germiteste. Sementes de nabo (A) e ervilhaca (B)



Fonte: Resultado da pesquisa (2024).

As sementes foram incubadas sob temperatura controlada, com a temperatura para as sementes de nabo mantida a 23°C e para as de ervilhaca ajustada a 20°C, conforme as Regras para Análise de Sementes (RAS, 2009). A primeira contagem de germinação para as sementes de nabo ocorreu após quatro dias. A segunda contagem, dez dias após o início do experimento, categorizou as sementes em plântulas normais, anormais, sementes inviáveis e não germinadas, permitindo a análise do vigor e dos efeitos dos tratamentos.

Para a ervilhaca, as contagens foram realizadas no quinto e no décimo quarto dia, seguindo o mesmo procedimento de classificação. Após as contagens, foram selecionadas as dez melhores plântulas de cada tratamento (totalizando 120 plântulas para cada espécie) para análise de massa verde e de massa seca. As plântulas foram pesadas para determinar a massa verde e, em seguida, secas em estufa a 60°C por 24 horas para obter a massa seca.

Esse procedimento permitiu comparar o acúmulo de biomassa entre os tratamentos. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância a 5% de probabilidade, e quando significativos, estimado as curvas de regressão utilizando o software estatístico SISVAR (FERREIRA et al., 2019).

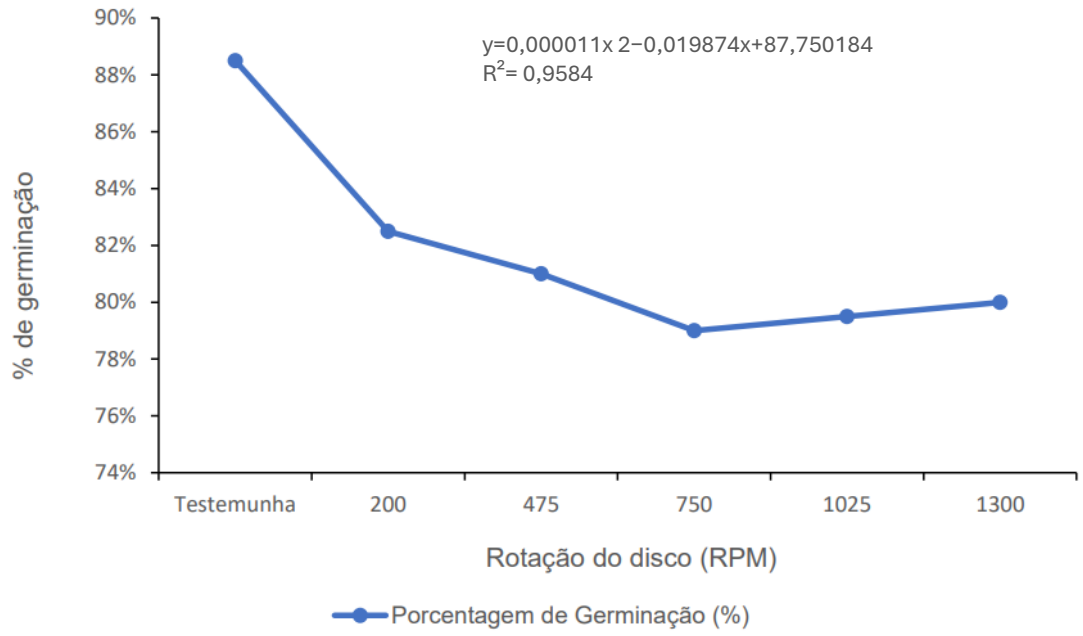
3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na análise de variância a 5% de probabilidade, e quando os resultados foram significativos, as curvas de regressão concretizaram-se estimadas usando o software SISVAR. A avaliação da germinação de sementes de ervilhaca em diversas rotações do drone DJI T40 revelou variações significativas, como pode ser visto na Figura 3, que apresenta a média de germinação, a rotação de 200 rpm resultou na maior média de germinação (83%), seguida de perto pela rotação de 475 rpm (81%). Esses resultados sugerem que rotações

ISBN 978-65-990392-6-3

moderadas podem ser ideais, promovendo uma dispersão eficiente sem causar danos mecânicos significativos, o que é vital para o vigor das plântulas. A literatura apoia essa observação, com estudos de Singh et al. (2023) e Jiyu et al. (2016) destacando que o ajuste preciso dos parâmetros de operação é crucial para evitar danos físicos e otimizar a germinação.

Figura 3. Média de Germinação de Sementes de ervilhaca por Tratamento.

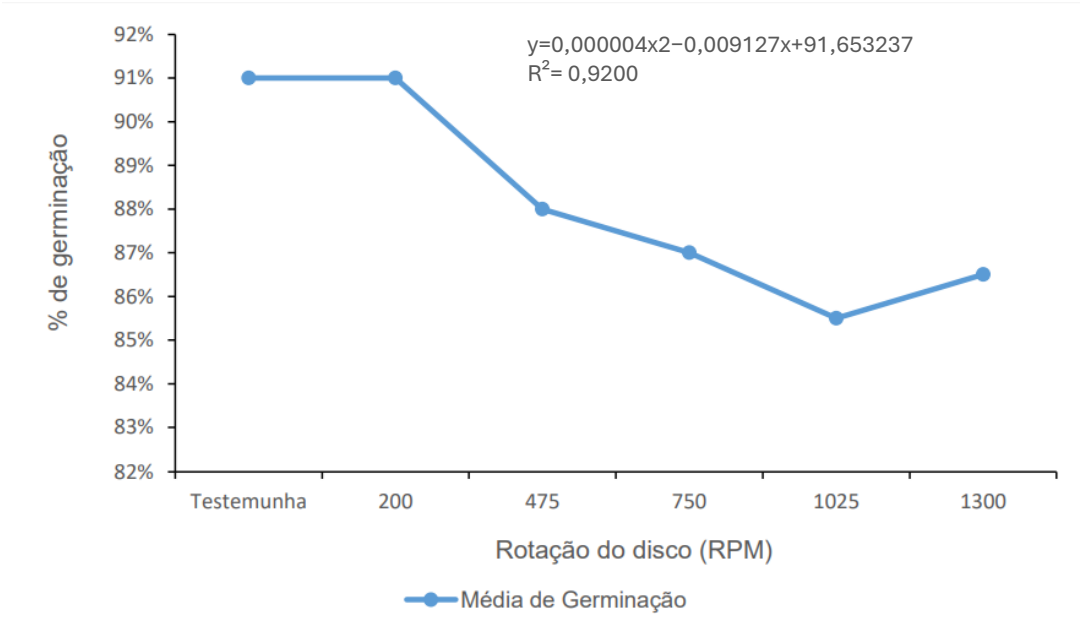


Fonte: Resultado da pesquisa (2024).

A Figura 4, mostra o impacto das rotações na germinação de sementes de nabo. A rotação de 200 rpm foi a mais eficaz, com uma média de germinação de 91%, seguida pela de 475 rpm com 88%. A tendência de queda na taxa de germinação com o aumento da rotação do dispersor é evidente, indicando que rotações mais baixas são mais favoráveis para a dispersão de sementes de nabo. Esse padrão é similar ao observado com a ervilhaca, sugerindo uma tolerância semelhante de ambas as espécies a rotações moderadas (BAIARDI et al., 2020).

ISBN 978-65-990392-6-3

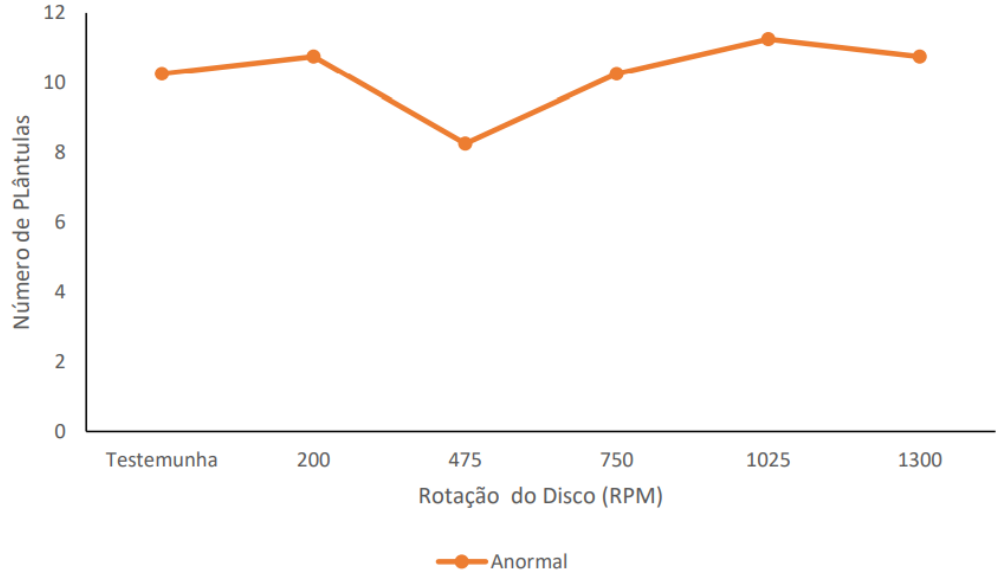
Figura 4. Média de Germinação de Sementes de nabo por Tratamento.



Fonte: Resultado da pesquisa (2024)

A análise de plântulas anormais de ervilhaca, mostrada na Figura 5, é fundamental para entender o impacto da semeadura na qualidade das plântulas. A rotação de 475 rpm apresentou uma média consideravelmente menor de plântulas anormais em comparação com as outras rotações. Essa observação reforça a importância de considerar a velocidade de dispersão para maximizar o desempenho da semeadura, como apontado por Singh et al. (2023).

Figura 5. Resultados de plântulas anormais de ervilhaca para cada Tratamento:

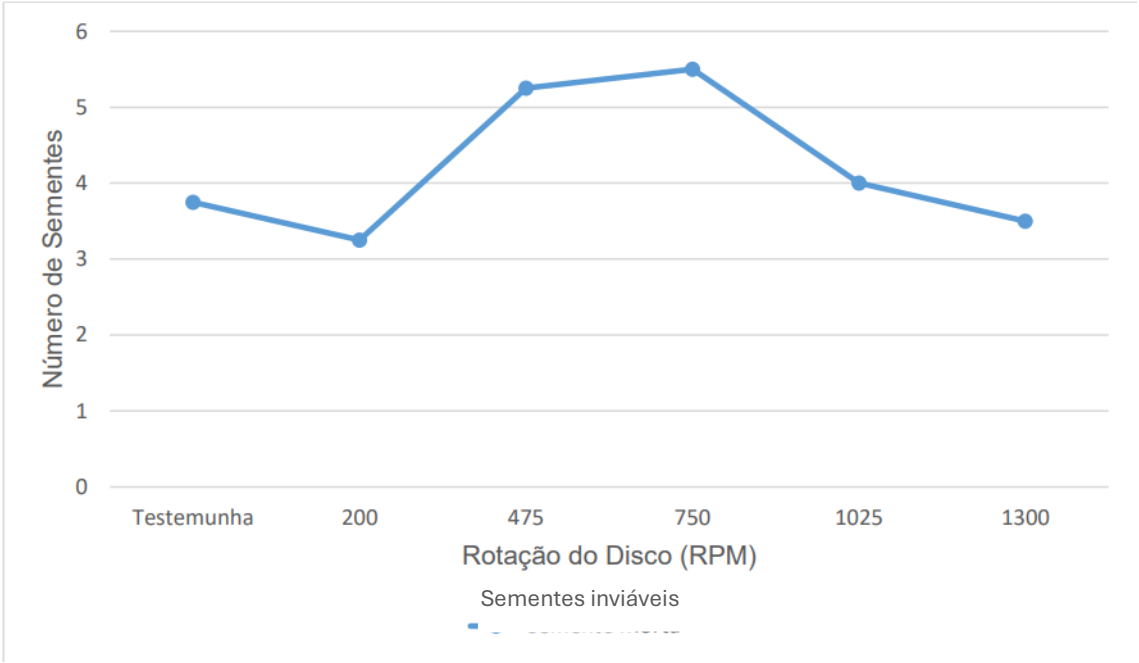


Fonte: Resultado da pesquisa (2024).

ISBN 978-65-990392-6-3

A Figura 6 detalha o número de sementes inviáveis de ervilhaca por tratamento. As rotações de 475 rpm e 750 rpm tiveram o maior número de sementes mortas, enquanto 200 rpm e 1300 rpm apresentaram números menores. Isso sugere que a rotação do dispersor pode ter efeitos complexos nas sementes de ervilhaca, e não apenas uma relação linear. Os dados de massa verde e de massa seca não mostraram diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos.

Figura 6. Resultados de sementes inviáveis de ervilhaca para cada tratamento.

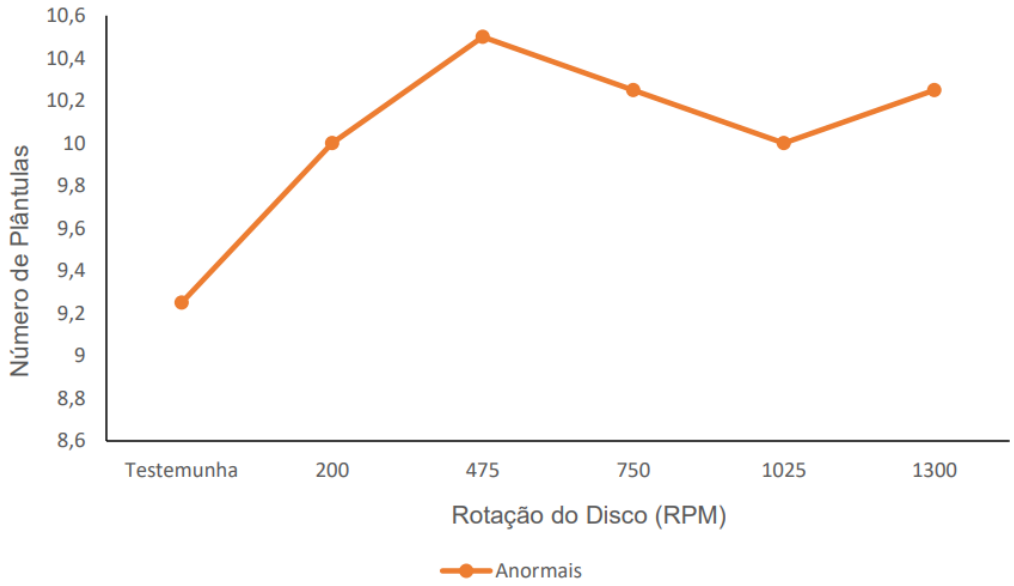


Fonte: Resultado da pesquisa (2024).

Para as sementes de nabo, o desenvolvimento das plântulas foi avaliado na segunda contagem, conforme a Figura 7. Esta análise, focada na germinação anormal, revelou que as rotações de 200 rpm e 475 rpm resultaram em médias de plântulas anormais mais próximas da testemunha e inferiores às demais, indicando que essas rotações são eficazes na manutenção da integridade das sementes de nabo. Esse resultado está em conformidade com as recomendações de Curado et al. (2013), que sugerem que ajustes operacionais podem melhorar a qualidade da semeadura aérea.

ISBN 978-65-990392-6-3

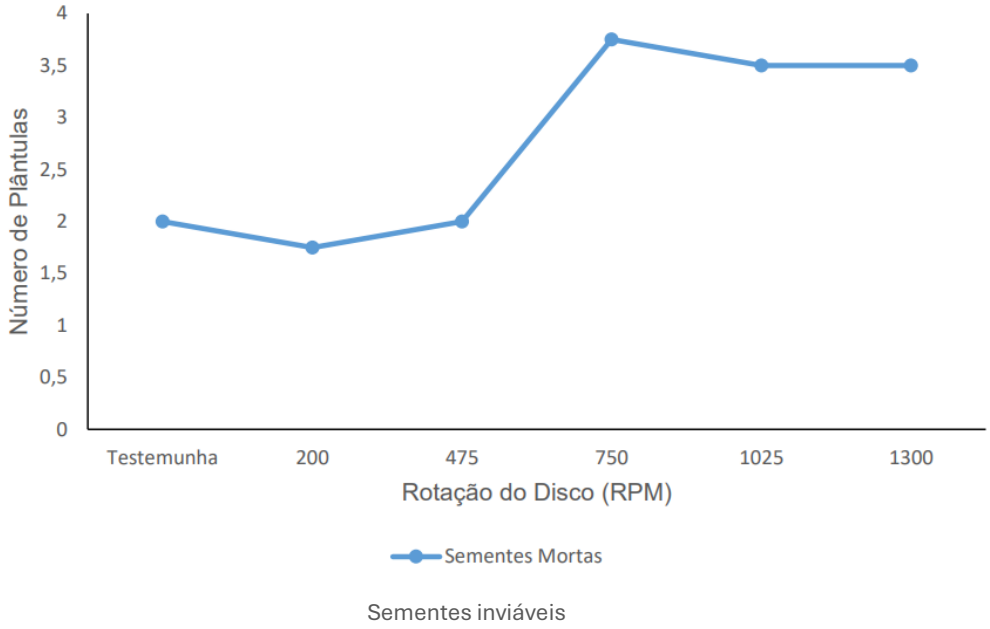
Figura 7. Resultados de plântulas anormais de nabo para cada tratamento.



Fonte: Resultado da pesquisa (2024).

A Figura 8 ilustra o número de sementes inviáveis de nabo. As rotações de 200 rpm e 475 rpm obtiveram os menores números de sementes inviáveis, confirmando-as como ideais para a semeadura de nabo com drones. Esses resultados enfatizam a necessidade de calibrar a rotação do dispersor de acordo com a espécie da semente para otimizar a semeadura e minimizar danos (SINGH et al., 2023).

Figura 8. Resultados de sementes inviáveis de nabo para cada tratamento

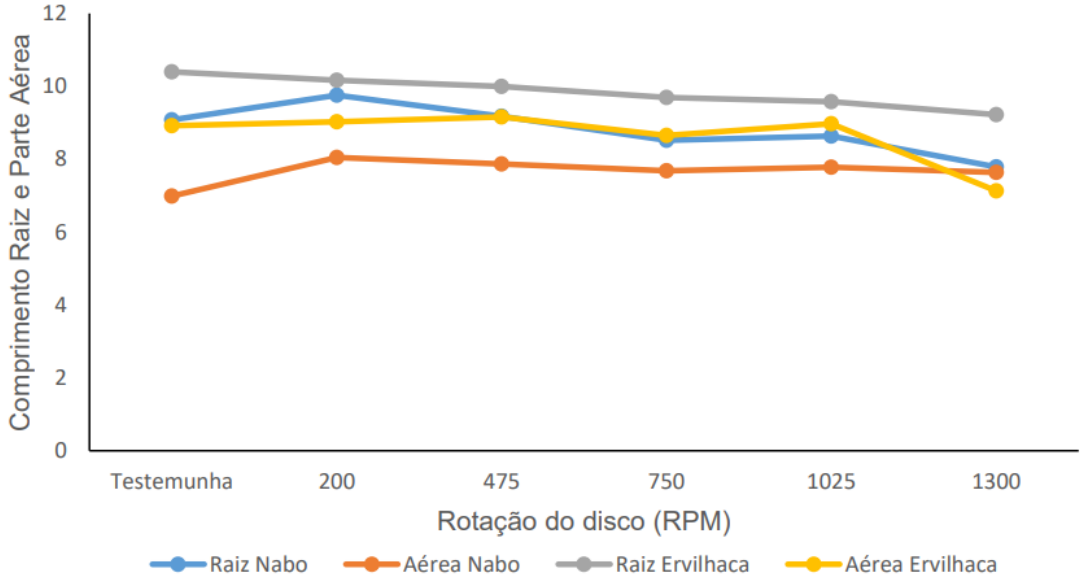


Fonte: Resultado da pesquisa (2024).

ISBN 978-65-990392-6-3

Finalmente, a Figura 9 apresenta a análise do comprimento da parte aérea e das raízes de nabo e ervilhaca. Nas rotações de 200 rpm e 475 rpm, obteve-se o maior comprimento de raiz e parte aérea para ambas as espécies, demonstrando um desenvolvimento inicial mais robusto. A partir de 750 rpm, houve uma redução progressiva no crescimento, um fenômeno que pode ser atribuído a potenciais danos mecânicos causados pela alta velocidade do dispersor. Segundo Silva et al. (2022) essa observação, destacando que o aumento da velocidade do dispersor pode prejudicar o desenvolvimento inicial das sementes.

Figura 9. Resultados de comprimento raiz e parte aérea nabo e ervilhaca



Fonte: Resultados da pesquisa (2024).

A análise completa dos dados de germinação, vigor e desenvolvimento inicial para sementes de nabo e ervilhaca demonstrou um padrão claro e consistente. As rotações mais baixas do dispersor do drone, especificamente 200 rpm e 475 rpm, foram as mais eficazes em todos os parâmetros avaliados. Essas rotações resultaram nas maiores taxas de germinação e no menor número de sementes mortas e plântulas anormais, evidenciando a menor ocorrência de danos mecânicos. Adicionalmente, o crescimento da parte aérea e do sistema radicular foi significativamente mais robusto nessas condições.

Por outro lado, o aumento da rotação do dispersor mostrou um efeito prejudicial progressivo na qualidade fisiológica das sementes, resultando em menor germinação e desenvolvimento inicial. Esses resultados destacam a importância crítica da calibração do equipamento de dispersão em semeaduras com drones para garantir a qualidade das sementes e o sucesso no estabelecimento da cultura. A adoção de parâmetros operacionais otimizados é, portanto, uma estratégia fundamental para maximizar os benefícios da agricultura de precisão.

ISBN 978-65-990392-6-3

4.CONCLUSÃO

A pesquisa demonstra que rotações baixas (200 e 475 rpm) do dispersor do drone proporcionam um padrão de germinação e vigor superior quanto a rotações de 750, 1025 e 1300 rpm para as sementes de nabo e ervilhaca. Os resultados indicam que essas rotações resultam em um maior número de plântulas normais e uma menor incidência de plântulas anormais e sementes inviáveis, confirmando a importância de uma calibração precisa do equipamento para otimizar a semeadura com drones.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAIARDI, A.; MENDES, F.; MENDES, J. Agricultura sustentável e biotecnologia: reflexões sobre a política agrícola e para a política de ciência**.** In: CONGRESSO DA SOBER, 48., 2020, Campo Grande. **Anais...** Brasília: SOBER, 2020, v. 1. p. 321-331.

CURADO, F. F.; SOUZA SANTOS, C. S. de; SILVA, F. Q. da. **Pré-diagnóstico participativo de agroecossistemas dos Assentamentos Paiolzinho e Tamarineiro II.** Corumbá: Embrapa Pantanal, 2013. 35 p. (Embrapa Pantanal. Documentos, 45).

FERREIRA, Daniel Furtado. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. JIYU, Li et al. Design and test of operation parameters for rice air broadcasting by unmanned aerial vehicle. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 9, n. 5, p. 24-32, 2016. DOI: 10.3965/j.ijabe.20160905.2248.

RAS. **Regras para análise de sementes.** Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Defesa Agropecuária**,** 2009. p.399

SILVA, J. R., Almeida, P. H., & Souza, F. M. (2022**). Revista Brasileira de Tecnologia Agrícola**, 10(2), 45-52.

SINGH, K. P., et al**. Unmanned Aerial Vehicle Direct Seeding Versus Ground Seeding Mechanization Services in Smallholder Farming Systems** of North West IGP on Energy Use Efficiency and Quality of Rice Culture: A Review. **International Journal of Environment and Climate Change**, v. 13, n. 9, p. 2105-2121, 2023.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 54

FLUXO GEOESTATÍSTICO AUTOMATIZADO PARA MAPEAMENTO DE PRODUTIVIDADE DE SOJA: VALIDAÇÃO K-FOLD E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE MODELOS VARIOGRÁFICOS

Automated Geostatistical Workflow for Soybean Yield Mapping: K-Fold Validation and Sensitivity Analysis of Variogram Models

Carlos Alberto Rigo Junior[1]; Daiane Luisa Rosso[1]; Lúcio de Paula Amaral[2]

[1] Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão, Santa Maria – RS, Brasil, carlos.rigo@acad.ufsm.br; daianerosso@hotmail.com
[2] Professor do Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão, Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria/UFSM, Avenida Roraima n.º 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria – RS, Brasil, amaralufsm@gmail.com

RESUMO

Este trabalho apresenta uma solução automatizada e rastreável para análise geoestatística da produtividade da soja, aplicada ao talhão Silo da Fazenda Irmãos Rigo, em André da Rocha (RS). O pipeline integra pré-processamento, filtragem de outliers, interpolação por krigagem e validação cruzada k-fold (k = 5), parametrizado por talhão e safra. Os scripts processam dados brutos e geram mapas de produtividade, semivariogramas e relatórios técnicos em múltiplos formatos (CSV, PDF, PNG), assegurando reprodutibilidade e adaptação a diferentes contextos dentro da cultura da soja. O modelo variográfico exponencial apresentou desempenho preditivo adequado ao uso operacional (RMSE = 0,6 t ha^{-1}; R^2 = 0,241), com outputs detalhados e métricas transparentes. A abordagem facilita a tomada de decisão agronômica, reduz erros manuais e pode ser adaptada para novos cenários dentro da cultura da soja, promovendo avanços em agricultura de precisão baseada em dados.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Geoestatística. Krigagem.

ABSTRACT

This work presents an automated and traceable solution for geostatistical analysis of soybean productivity, applied to the Silo field at Irmãos Rigo Farm, in André da Rocha (RS), Brazil. The pipeline integrates preprocessing, outlier filtering, kriging interpolation, and k-fold cross-validation (k = 5), parameterized by field and harvest season. The scripts process raw data and generate productivity maps, semivariograms, and technical reports in multiple formats (CSV, PDF, PNG), ensuring reproducibility and adaptation to different contexts within soybean cultivation. The exponential variogram model showed predictive performance suitable for operational use (RMSE = 0.6 t ha^{-1}; R^2 = 0.241), with detailed outputs and transparent metrics. The approach facilitates agronomic decision-making, reduces manual errors, and can be adapted to new scenarios within soybean cultivation, promoting advances in data-driven precision agriculture.

Keywords: Precision agriculture. Geostatistics. Kriging.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max*) é uma cultura estratégica para o agronegócio brasileiro, com impacto relevante na economia nacional. O Brasil consolidou-se como um dos principais produtores e exportadores mundiais, e compreender os fatores que influenciam a produtividade é fundamental para sustentar essa posição. Nesse cenário, a análise da variabilidade espacial da produtividade torna-se indispensável para o manejo eficiente da lavoura e para o uso racional de insumos (SILVA, 2024).

A agricultura de precisão representa uma alternativa tecnológica para lidar com a heterogeneidade espacial, permitindo identificar e manejar áreas de potencial produtivo distinto. Segundo Grego, Oliveira e Vieira (2014), a geoestatística é essencial nesse processo, pois caracteriza a dependência espacial dos dados agrícolas e possibilita a geração de mapas temáticos que subsidiam decisões em nível local.

A geoestatística, fundamentada nos trabalhos de Matheron (1962, 1965), parte da teoria das variáveis regionalizadas, considerando que valores próximos no espaço tendem a ser mais semelhantes. Entre suas técnicas, destaca-se a krigagem, método de interpolação amplamente utilizado na agricultura de precisão, capaz de fornecer estimativas precisas e construir mapas de produtividade com base em semivariogramas ajustados.

No Brasil, diversos estudos têm demonstrado a aplicabilidade da krigagem para a cultura da soja. Santana et al. (2024) observaram a influência da variabilidade de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sobre componentes de produção, gerando mapas interpolados por krigagem. Gomes et al. (2022) evidenciaram a relação entre atributos químicos do solo e produtividade, destacando a importância da interpolação geoestatística no manejo racional de fertilizantes. Oliveira, Franchini e Debiasi (2011) mapearam a produtividade da soja por krigagem em área sob plantio direto, reforçando o uso operacional de geoestatística em escala de talhão.

Em sistemas sob plantio direto no Sul do Brasil, evidências clássicas mostram que a produtividade apresenta continuidade e dependência espacial, com padrões recorrentes entre safras, o que sustenta o uso de semivariogramas e krigagem para mapear a produtividade e orientar decisões de manejo (AMADO et al., 2007).

Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo caracterizar e mapear a variabilidade espacial da produtividade de soja no talhão Silo, Fazenda Irmãos Rigo, em André da Rocha (RS), utilizando dados de monitor de colheita da safra 2024–2025 e empregando semivariogramas e krigagem ordinária, com quantificação da acurácia preditiva por validação *k-fold.* A hipótese é que a produtividade apresenta dependência espacial mensurável em escala intra-talhão e que pelo menos um modelo variográfico clássico apresentará desempenho preditivo superior segundo critérios objetivos de erro e ajuste.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO E DADOS

O estudo foi conduzido na Fazenda Irmãos Rigo, talhão Silo, localizada no município de André da Rocha, Rio Grande do Sul, Brasil, com área de 56,18 ha. A área de interesse foi delimitada por polígono vetorial obtido do limite operacional do talhão. Os dados geoespaciais originais foram registrados em `EPSG:4326` (WGS 84), com extensão espacial aproximada de [-51,51, −28,54] a [-51,50, −28,53] (longitude/latitude) e altitude média de aproximadamente 800 m. Para todas as análises métricas e para a geração de mapas, os dados foram reprojetados para `EPSG:32722` (WGS 84 / UTM 22S), adequado à região sul do Brasil.

ISBN 978-65-990392-6-3

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho, com textura predominantemente argilosa. O clima da região foi classificado pelo método de Köppen (ALVARES, 2013), como Cfb, clima temperado com as quatro estações bem definidas, invernos rigorosos e verões amenos, tendo uma temperatura média anual de 17,1 °C. Ocorre uma pluviosidade significativa ao longo do ano, com cerca de 1.926 mm numa base anual (CLIMATE-DATA, 2024).

Figura 1 – Detalhes da área de estudo, talhão Silo, Fazenda Irmãos Rigo, André da Rocha (RS). Limite operacional do talhão e elementos de referência.



Fonte: Autores (2025)

A cultura avaliada foi soja (variedade BMX VÊNUS), referente à safra 2024/2025. A variável primária analisada foi a produtividade de colheita, expressa em t ha^{-1}, medida pontualmente ao longo das passadas da colhedora.

A aquisição dos dados foi realizada por colhedora John Deere S760, equipada com sistema de monitoramento integrado que registra, de forma sincronizada, produtividade, umidade dos grãos, elevação do terreno, velocidade de deslocamento e largura da faixa de colheita. As observações são georreferenciadas e armazenadas em formato adequado ao processamento subsequente e preservaram os atributos operacionais relevantes.

Além da produtividade, foram consideradas como camadas auxiliares, altitude (m), umidade dos grãos (%), velocidade da colhedora (km h^{-1}) e largura da faixa de colheita (m). Essas variáveis foram utilizadas para correções (por exemplo, ajuste da produtividade para 14 % de umidade) e para controle de qualidade dos registros, conforme descrito nas subseções seguintes.

2.2 INSPEÇÃO E QUALIDADE DOS DADOS

A inspeção inicial foi realizada na plataforma *Visual Studio Code* (VS Code), com o *script* `inspetor_final.py`, desenvolvido pelos autores, que produz uma ficha técnica do arquivo bruto sem efetuar remoções. O insumo inspecionado seguiu o padrão: `Irmãos Rigo_Granja Rigo_silo_Harvest_2025.shp` (caminho: `1_dados/brutos/Export_silo_2025/doc/`).

O relatório registra cabeçalho de rastreabilidade (nome do arquivo, data/hora, dimensões), CRS original (`EPSG:4326`) e extensão espacial. O inventário de colunas lista os campos brutos com percentuais de faltantes, valores únicos e outliers (critério 1,5 × IQR). Entre os atributos principais estão produtividade (`VRYIELDMAS`), umidade (`Moisture`), elevação (`Elevation`), velocidade (`VEHICLSPEED`) e largura de faixa (`SWATHWIDTH`).

Estatísticas descritivas foram calculadas por variável (contagem, média, desvio-padrão, quartis). Duplicados são contabilizados por igualdade de linha, e nulos por coluna, sem ações

ISBN 978-65-990392-6-3

corretivas neste estágio. O módulo inclui alertas automáticos para produtividade > 15,0 t ha⁻¹. O relatório final foi exportado como arquivo de extensão PDF salvo em, `4_relatorios/silo_2025/ficha_tecnica_FINAL_silo_2025.pdf`.

2.3 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS

O pré-processamento dos dados foi realizado com *script* `processador_2025.py`, desenvolvido pelos autores, a partir de arquivos no padrão: `Irmãos_Rigo_Granja Rigo_silo_Harvest_2025*.shp` (caminho: `1_dados/brutos/Export_silo_2025/doc/`). Nesta etapa efetuam-se padronizações de nomenclatura, cálculo de variáveis derivadas e aplicação de filtros determinísticos, mantendo-se o sistema de referência `EPSG:4326`; a reprojeção para `EPSG:32722` ocorre nas etapas geoestatísticas.

O processo de padronização dos campos brutos seguiu a seguinte estrutura: `VRYIELDMAS` → `Prod_Bruta_ton_ha` (t ha⁻¹), `Moisture` → `Umidade_pct` (%), `Elevation` → `Altitude_m` (m), `VEHICLSPEED` → `Velocidade_km_h` (km.h⁻¹), `SWATHWIDTH` → `Largura_Faixa_m` (m) e `geometry` (coordenadas em `EPSG:4326`). A partir da geometria foram extraídas as colunas `coord_x` e `coord_y`. A produtividade foi corrigida para umidade padrão de 14%, conforme a fórmula de correção em base úmida (CRUZ et al., 2011), dada pela Equação (1).

$$Y_{corr} = Y_{bruta} \times \frac{100 - U}{100 - 14} \quad (1)$$

Onde: Y_{corr} = produtividade corrigida (t ha⁻¹); Y_{bruta} = produtividade bruta (t ha⁻¹); U = umidade dos grãos (%).

O campo final de análise foi definido como `Prod_Corrigida_ton_ha`. Foram utilizados filtros determinísticos e a filtragem seguiu a seguinte sequência e justificativas, (i) remoção de registros com produtividade ≤ 0, para eliminar leituras inválidas; (ii) remoção de pontos atípicos (outliers) em `Prod_Corrigida_ton_ha` pelo intervalo interquartil (IQR) com fator 1,5×IQR, que reduz o efeito de valores extremos (GAUCI et al., 2024); (iii) filtragem por velocidade, para manter o intervalo de 3,0 a 6,0 km h⁻¹ (limites inclusivos), conforme recomendações operacionais para precisão do monitor (DEERE e COMPANY, 2018); (iv) filtragem por largura de colheita, que manteve a `Largura_Faixa_m` ≥ 90 % da largura máxima observada, para excluir passadas incompletas e sobreposições. Não houve remoção de duplicatas nesta etapa; dados nulos em variáveis-chave foram eliminados indiretamente pelos filtros quando se aplicam os critérios.

A contagem de remoções e o conjunto resultante mostraram que, no caso Silo/2025, o relatório do processador registrou a remoção de 1.060 pontos por produtividade zero, 3.933 por IQR, 8.777 por velocidade e 5.129 por largura, que totalizaram 18.899 pontos (31,3 % do conjunto bruto). Permaneceram 41.473 observações válidas, com média pós-filtro de 5,50 t ha⁻¹, equivalente a 91,7 sacas ha⁻¹.

A checagem externa de consistência foi realizada através de pesagem real para aferir a plausibilidade dos filtros, e a média pós-filtro (5,50 t ha⁻¹; 91,7 sacas ha⁻¹) foi comparada à produtividade real do talhão (5,82 t ha⁻¹; 97,0 sacas ha⁻¹) obtida por pesagem de cargas. A diferença relativa foi de 5,5 %, compatível com faixas reportadas para monitores de colheita sob variação de fluxo e condições de campo, nas quais discrepâncias de até 10 % podem

ISBN 978-65-990392-6-3

ocorrer em função de calibração e dinâmica do fluxo de grãos (BURKS et al., 2004; DEERE e COMPANY, 2018; GAUCI et al., 2024).

Esta etapa gerou as seguintes saídas, (i) CSV pós-processado (entrada única para as análises geoestatísticas); e (ii) PDF de processamento com estatísticas pós-filtro e contagens por regra aplicada. Os dados resultantes alimentaram diretamente as etapas de semivariograma, krigagem ordinária pontual e validação cruzada, garantindo integridade e rastreabilidade ao longo do fluxo de processamento. Os limiares e regras de cada filtro aplicado no pré-processamento estão detalhados na Tabela 1.

Tabela 1 — Limiares dos filtros aplicados no pré-processamento (Silo/2025)

Filtro	Variável (unidade)	Regra / Limiar	Justificativa	Removidos (N)	Removidos (%)[2]
Produtividade ≤ 0	Produtividade (t ha⁻¹)	≤ 0	Leituras inválidas / erro de sensor	1.060	1,8
Outliers (IQR)	Produtividade corrigida (t ha⁻¹)	1,5 × IQR[1]	Reduzir influência de valores extremos	3.933	6,5
Velocidade	Velocidade da colhedora (km h⁻¹)	3,0–6,0 (limites inclusivos)[3]	Faixa operacional recomendada para acurácia do monitor	8.777	14,5
Largura de faixa	Largura de colheita (m)	≥ 90 % da largura máxima observada[4]	Remover passadas incompletas/sobreposição	5.129	8,5
Total	—	—	—	18.899	31,3

Legenda:
[1] IQR = intervalo interquartil; *outliers* identificados em `Prod_Corrigida_ton_ha`.
[2] Percentuais calculados sobre o conjunto bruto N = 60.372 observações (antes dos filtros).
[3] Intervalo inclusivo (registros com 3,0 e 6,0 km h⁻¹ são mantidos).
[4] Largura de referência definida como largura máxima observada no talhão/ano.
Fonte: Autores (2025)

2.4 GERAÇÃO DA GRADE 20 × 20

A malha de suporte para predição foi gerada em `EPSG:32722` (WGS 84 / UTM 22S), com uso do polígono do talhão como máscara espacial. A grade possui resolução de 20 × 20 m e foi definida pelos centroides das células. O alinhamento foi calculado a partir da extensão do polígono (mínimos `xmin` e `ymin`), criando-se sequências regulares em x e y com passo de 20 m; em seguida, os pontos foram recortados internamente ao talhão por junção espacial (predicado `within`), conforme recomendado em geoestatística aplicada (WEBSTER; OLIVER, 2007).

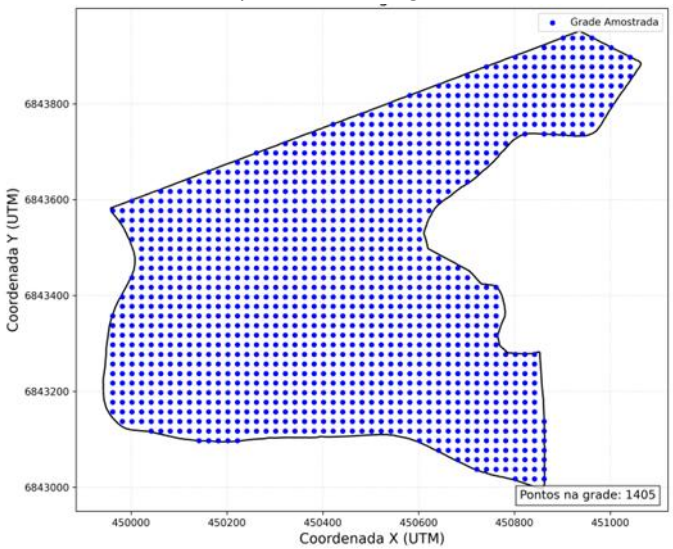
Não houve agregação prévia dos pontos de colheita à malha. Os dados originais alimentam a krigagem ordinária pontual, enquanto a grade serviu exclusivamente como suporte de predição. Para operações auxiliares, foi utilizada a associação do tipo *nearest neighbor*

ISBN 978-65-990392-6-3

(cada ponto da grade vincula-se ao ponto amostral mais próximo), sem alterar os valores utilizados na interpolação. Como produtos, foram gerados, (i) a ilustração da grade sobre o polígono do talhão (Figura 2) (`3_resultados/silo_2025/mapas/mapa_grade_amostragem_silo_2025.png`);

e (ii) um arquivo NPZ com coordenadas, valores e extensão da malha (`amostragem_silo_2025.npz`), que subsidia a exportação do GeoTIFF de krigagem (`mapa_krigagem_silo_2025.tif`) nas etapas seguintes.

Figura 2 - Grade regular de 20 × 20 m recortada pelo polígono do talhão Silo (`EPSG:32722`; UTM 22S). Pontos na grade: 1.405.



Fonte: Autores (2025).

2.5 SEMIVARIOGRAMA (25 LAGS; PEPITA/PATAMAR/ALCANCE)

O semivariograma experimental da variável `Prod_Corrigida_ton_ha` (t ha^{-1}) foi calculado de forma omnidirecional com 25 lags, com uso do semivariograma de Matheron (1963).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2\,n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \qquad (2)$$

Onde: $\gamma(h)$ = semivariância experimental (na unidade da variável ao quadrado); h = distância de separação entre dois pontos para obter a diferença de valores (*lag*); $n(h)$ = número de pareamentos no *lag* h; $Z(x_i)$ = valor observado no ponto x_i; $Z(x_i + h)$= valor no ponto separado de x_i pela distância h.

A distância máxima considerada seguiu a prática do software empregado (fração da dimensão da área; aproximadamente metade da diagonal do talhão), assegurando número adequado de pares por *lag*. Os modelos esférico, exponencial e gaussiano foram ajustados por mínimos quadrados ordinários (*ordinary least squares*, OLS), estimando-se efeito pepita, patamar e alcance. Quando especificado, o efeito pepita foi fixado como fração do patamar (5 %), critério operacional adotado para evitar superestimação do efeito pepita e favorecer a estabilidade do ajuste. Os parâmetros obtidos para o caso Silo/2025 estão na Tabela 2; a

seleção final do modelo é detalhada na Seção 2.7 (validação *k-fold*). A escolha dos modelos clássicos, do procedimento de ajuste e do número de *lags* segue a literatura consolidada (MATHERON, 1963; JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978; WEBSTER; OLIVER, 2007).

Tabela 2 — Parâmetros do semivariograma por modelo (Silo/2025)

Modelo	Pepita (t² ha⁻²)	Patamar (t² ha⁻²)	Alcance (m)
Esférico	0,027	0,532	634,2
Exponencial²	0,028	0,565	868,7
Gaussiano¹	0,025	0,508	417,5

Legenda:
¹ Ajuste gaussiano reprovado (RMSE = 414,2158), não considerado na comparação final.
² Modelo selecionado na validação: Exponencial (RMSE = 0,5550).
Fonte: Autores (2025)

2.6 KRIGAGEM ORDINÁRIA PONTUAL (PYKRIGE)

A krigagem ordinária pontual (*kriging*) foi aplicada sobre grade regular de 5 × 5 m (`EPSG:32722`), cobrindo todo o interior do polígono do talhão. Utilizou-se o modelo exponencial selecionado na Seção 2.5 por validação cruzada *k-fold* (menor RMSE), com parâmetros: pepita = 0,028 t² ha⁻², patamar = 0,565 t² ha⁻² e alcance = 868,7 m. As predições foram obtidas pela combinação linear ótima dos valores amostrais (Equação 3), sujeitas à restrição de não tendenciosidade (Equação 4), conforme a formulação clássica (MATHERON, 1963; ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; WEBSTER; OLIVER, 2007). A implementação utiliza `PyKrige` (v1.7.x) como biblioteca principal, com *fallback* automático para `scikit-gstat` quando necessário (MURRAY; SHAH; GRIFFITHS, 2018; MÄLICKE et al., 2022).

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \, Z(x_i) \tag{3}$$

Onde: $\hat{Z}(x_0)$ = estimativa de produtividade no ponto não amostrado x_0 da grade (t ha⁻¹); $Z(x_i)$ = valor observado no i-ésimo ponto amostral (t ha⁻¹); λ_i = peso de krigagem do i-ésimo ponto (adimensional), calculado a partir do semivariograma e da vizinhança; n = número de vizinhos usados na estimativa ($5 \leq n \leq 20$); x_i = posição dos pontos amostrais; x_0 = posição do ponto a ter o valor da variável em análise estimado.

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \tag{4}$$

Onde: $\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1$ expressa a restrição de não tendenciosidade da krigagem ordinária, o que garante que a média local (desconhecida) seja preservada.

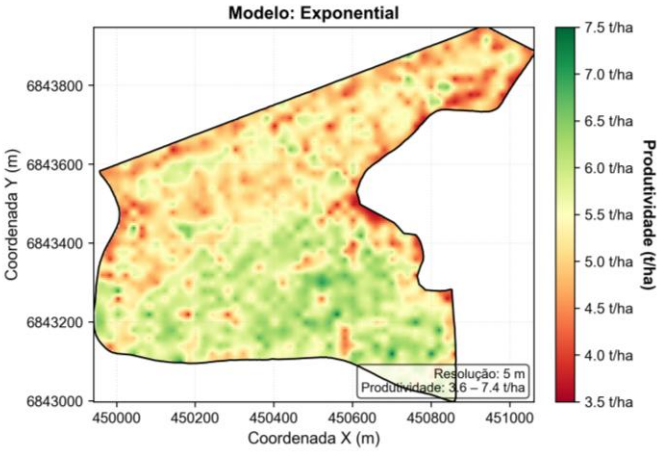
Parâmetros de vizinhança. Raio de busca = 1,0 × alcance (869 m); mínimo 5 e máximo 20 vizinhos por estimativa; seleção omnidirecional (sem setorização) e isotrópica. Não foram aplicadas transformações aos dados; valores negativos eventualmente estimados foram truncados para 0 t ha⁻¹. A interpolação foi restrita ao interior do polígono do talhão (*within*).

ISBN 978-65-990392-6-3

O mapa final de produtividade (t ha⁻¹) foi gerado por krigagem ordinária com modelo exponencial, em grade regular de 5 × 5 m (`EPSG:32722`). Como mostra a Figura 3, a superfície é contínua e a escala de cores sequencial (`RdYlGn`), que facilita a leitura das zonas de menor para maior rendimento.

Para uso e documentação, o mapa foi exportado em GeoTIFF (resolução de 5 m; NoData
fora do talhão) no caminho `3_resultados/silo_2025/mapas/mapa_krigagem_silo_2025.tif`, e em PNG (300 dpi) em `3_resultados/silo_2025/mapas/mapa_krigagem_silo_2025.png`. Os parâmetros efetivos de execução foram registrados em `parametros_execucao.json`, assegurando reprodutibilidade.

Figura 3 - Produtividade de soja por krigagem ordinária pontual (modelo exponencial), grade 5 × 5 m, `EPSG:32722`



Fonte: Autores (2025).

2.7 VALIDAÇÃO (K-FOLD K=5) E CRITÉRIOS

A validação cruzada foi conduzida com `k = 5`, `shuffle = True` e `random_state = 42`, assegurando partições aleatórias e reprodutíveis (KUHN; JOHNSON, 2013). Em todas as dobras, manteve-se fixo o modelo variográfico exponencial e seus parâmetros estimados na Seção 2.5 (pepita = 0,028 t² ha⁻²; patamar = 0,565 t² ha⁻²; alcance = 868,7 m), garantindo comparabilidade entre validação e krigagem (WEBSTER; OLIVER, 2007). As predições foram realizadas apenas nas coordenadas dos pontos excluídos em cada dobra (*out-of-fold*), procedimento recomendado para evitar viés e superestimação de desempenho em dados espaciais (LI; HEAP, 2014). As estatísticas para avaliação computadas foram RMSE, MAE e R^2 (Equações 5–7), amplamente empregadas em modelagem preditiva espacial contínua (HENGL et al., 2018; KUHN; JOHNSON, 2013).

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{Z}_i - Z_i\right)^2} \tag{5}$$

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\hat{Z}_i - Z_i\right| \tag{6}$$

ISBN 978-65-990392-6-3

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{Z}_i - Z_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Z_i - \bar{Z})^2} \quad (7)$$

Onde: Z_i = produtividade observada no ponto i ($\mathrm{t\,ha^{-1}}$); $\hat{Z}_i$ = produtividade predita por krigagem no mesmo ponto ($\mathrm{t\,ha^{-1}}$); $\bar{Z}$ = média amostral de Z ($\mathrm{t\,ha^{-1}}$); n = número de predições *out-of-fold*; i = índice dos pontos (1,…,n).
Unidades: RMSE e MAE em $\mathrm{t\,ha^{-1}}$; R^2 adimensional.

Definição usada na Tabela 3: $\Delta\mathrm{RMSE} = \mathrm{RMSE}_{\mathrm{modelo}} - \min(\mathrm{RMSE})$, calculado nos valores brutos e reportado com 3 casas. Os parâmetros de vizinhança e de busca na validação replicaram exatamente os usados na krigagem (Seção 2.6): raio = 1,0 × alcance (869 m), mínimo 5 e máximo 20 vizinhos por estimativa, seleção omnidirecional (sem setorização) e isotrópica. Não foram aplicadas transformações aos dados e não se removeu outliers nos resíduos da validação, isto é, não se aplicou IQR aos erros absolutos, mantendo postura conservadora para evitar subavaliação do desempenho do modelo. Os *outliers* já haviam sido tratados no pré-processamento (Seção 2.3), conforme recomendações metodológicas (LI; HEAP, 2014).

O conjunto validado totalizou N = 41.473 observações (pós-filtro), que foi dividido em cinco subconjuntos (ou dobras) para a validação cruzada *k-fold*, resultou em aproximadamente 8.295 pontos em cada partição. Os resultados foram agregados por média e desvio-padrão entre as cinco dobras e apresentados em tabela única (Tabela 3), conforme prática de síntese na validação cruzada (WEBSTER; OLIVER, 2007; KUHN; JOHNSON, 2013). A regra de seleção do modelo para a krigagem final adotou menor RMSE (desempate por maior R²). Como critérios mínimos de qualidade, considerou-se R² ≥ 0,20, pepita ≥ 5 % do patamar e alcance ≤ 5× o maior lag amostrado, além de inspeção visual dos resíduos para detecção de erros operacionais.

Tabela 3 — Validação cruzada (k = 5) da krigagem ordinária (Silo/2025)

Modelo	Status	RMSE[1] (t ha⁻¹)	ΔRMSE[2] (t ha⁻¹)	R²[3]	Alcance[4] (m)	Patamar[5] (t² ha⁻²)	Pepita[5] (t² ha⁻²)
Exponencial	Aprovado	0,6	0,000	0,241	869	0,565	0,028
Esférico	Aprovado	0,6	0,001	0,240	634	0,532	0,027
Gaussiano	Reprovado[6]	—	—	—	418	0,508	0,025

Legenda:
[1] RMSE com 1 casa decimal.
[2] ΔRMSE = RMSE do modelo - menor RMSE (calculado nos valores brutos; reportado com 3 casas).
[3] R² com 3 casas decimais.
[4] Alcance sem casas.
[5] Patamar e pepita com 3 casas (parâmetros da Seção 2.5; pepita 5 % do patamar).
[6] Reprovado no ajuste variográfico (Seção 2.5); modelo não avaliado na validação *k-fold*.
Conjunto validado: N = 41.473 (8.295 por dobra).

Fonte: Autores (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

Saídas e reprodutibilidade. As estatísticas agregadas foram salvas em `3_resultados/silo_2025/tabelas/validacao_k5_silo_2025.csv`. Caso necessário, o gráfico observado vs. predito pode ser exportado para `3_resultados/silo_2025/mapas/val_kfold_silo_2025.png`. A documentação de parâmetros efetivamente usados permanece registrada em `parametros_execucao.json`. A implementação baseia-se em `PyKrige` (v1.7.x) para as predições pontuais e `scikit-gstat` para ajuste do variograma; ambos são *open-source* e possuem documentação pública estável.

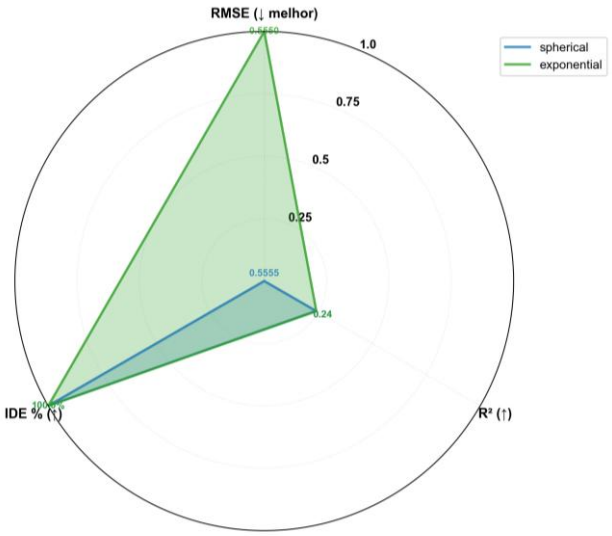
2.8 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE ENTRE MODELOS VARIOGRÁFICOS

A análise de sensibilidade entre modelos variográficos foi conduzida de forma automatizada pelo *script* `analise_sensibilidade_geoestatistica.py`, desenvolvido pelos autores. O objetivo foi avaliar o impacto da escolha do modelo variográfico (esférico, exponencial, gaussiano) no desempenho da krigagem ordinária pontual (*kriging*), mantendo todos os demais parâmetros do ajuste e da interpolação fixos, conforme detalhado nas seções anteriores.

O *script* executou o fluxo de comparação de maneira reprodutível e transparente, lê resultados já gerados ou executa o pipeline de krigagem para cada modelo, aplica validação cruzada *k-fold* (`k = 5`, `shuffle=True`, `random_state=42`) e calcula as métricas RMSE (primária), MAE e R^2 (Equações 5–7). Os critérios mínimos de qualidade seguem recomendações clássicas da geoestatística (WEBSTER; OLIVER, 2007): pepita ≥ 5 % do patamar, $R^2 \geq 0{,}20$, alcance ≤ 5 × o maior lag e RMSE ≤ 5 × a mediana. Modelos que não atendem a algum desses critérios são automaticamente sinalizados como reprovados, com justificativa documentada.

Além da tabela comparativa com as principais métricas de cada modelo, apresenta-se o radar de desempenho (Figura 4), que sintetiza graficamente o resultado relativo por métrica (RMSE, R^2, IDE %). Essa visualização facilita a identificação do modelo mais equilibrado e robusto para uso final. Quando aplicável, o modelo gaussiano é explicitamente indicado como reprovado no ajuste variográfico.

Figura 4 - Radar de desempenho por modelo variográfico (métricas normalizadas; RMSE invertido).



Legenda: Valores mais próximos da borda indicam melhor desempenho. Métricas consideradas: RMSE, R^2 e IDE %. Modelos exibidos: esférico e exponencial; o gaussiano foi reprovado no ajuste variográfico.

Fonte: Autores (2025).

O modelo selecionado para uso final foi aquele com menor RMSE; em caso de empate, adota-se maior R^2. Esse procedimento sistemático garante que a escolha do modelo variográfico seja baseada em critérios estatísticos rigorosos, para assegurar a qualidade, a rastreabilidade e a reprodutibilidade dos resultados da krigagem ordinária (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978).

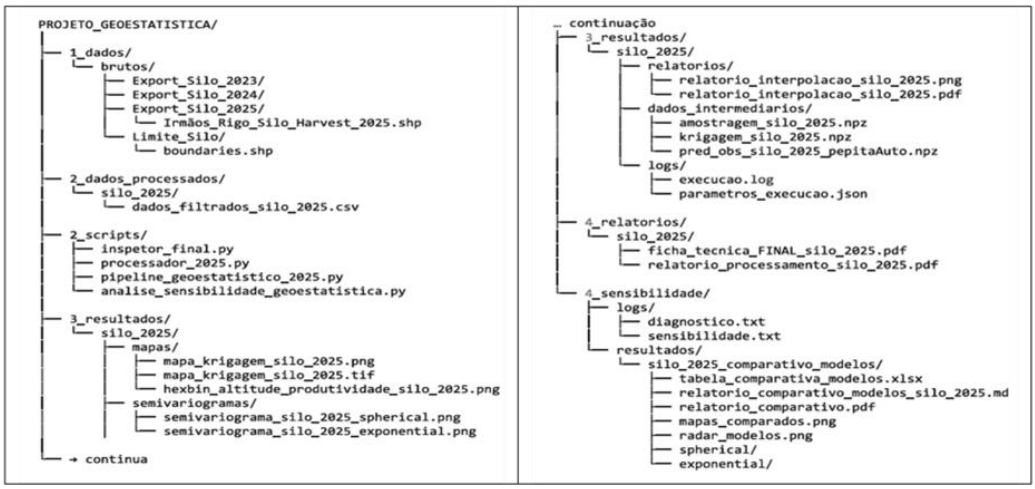
2.9 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E FERRAMENTAS DESENVOLVIDAS

O processamento dos dados foi realizado em ambiente *Windows,* utilizando `Python 3.13.5` em ambiente virtual isolado (`.venv`) e gerenciamento de pacotes via `pip`. O *hardware* empregado foi de classe Intel Core i5 com 16 GB de RAM, suficiente para todas as etapas do fluxo geoestatístico, que incluem inspeção, pré-processamento, ajuste variográfico, krigagem e análise de sensibilidade. Todas as rotinas relevantes utilizaram `seed=42`, para assegurar reprodutibilidade das partições de validação e de quaisquer operações pseudoaleatórias.

O fluxo computacional foi composto por quatro scripts de autoria dos pesquisadores, `inspetor_final.py`, `processador_2025.py`, `pipeline_geoestatistico_2025.py` e `analise_sensibilidade_geoestatistica.py`. O projeto adota uma estrutura de pastas padronizada e automatizada, com criação dinâmica de subdiretórios para cada safra e modelo processado (Figura 5).

Os principais diretórios incluem: `1_dados/brutos` (dados originais), `2_dados_processados` (dados filtrados), `3_resultados` (mapas, *logs*, intermediários), `4_relatorios` (relatórios finais) e `4_sensibilidade` (saídas da comparação entre modelos). Os *scripts* registraram diagnósticos e sensibilidade em arquivos de *log* (por exemplo, `diagnostico.txt`, `sensibilidade.txt`) e salvaram todos os parâmetros de execução em arquivos `parametros_execucao.json`, garantindo rastreabilidade.

Figura 5 - Estrutura de pastas do projeto e artefatos principais (Silo/2025).



Legenda: Organização por etapas: `1_dados/brutos` (entradas), `2_dados_processados` (pós-filtro), `2_scripts` (*scripts* do fluxo), `3_resultados/silo_2025` (mapas, semivariogramas, relatórios, arquivos intermediários e logs), `4_relatorios/silo_2025` (PDFs finais) e `4_sensibilidade/resultados/silo_2025_comparativo_modelos` (tabelas/figuras da comparação entre modelos). As pastas e arquivos são criados automaticamente pelos scripts durante a execução; apenas a safra 2025 foi processada. O modelo gaussiano foi reprovado e, por isso, não possui subpasta/arquivos na figura.

Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

As versões mínimas requeridas das bibliotecas foram: `Python 3.13.5`; `NumPy ≥ 1.26`; `Pandas ≥ 2.2`; `GeoPandas ≥ 0.14`; `Matplotlib ≥ 3.8`; `scikit gstat ≥ 0.6.9`; `PyKrige ≥ 1.7`; `Rasterio ≥ 1.3`; `Shapely ≥ 2.0`; `scikit-learn ≥ 1.4`. As versões exatas utilizadas em cada execução ficaram registradas nos arquivos de diagnóstico. Dependências adicionais (`python-docx`, `fpdf`) foram utilizadas para geração automática de relatórios em `DOCX` e `PDF`, complementando as saídas em `HTML` e `Excel`. O projeto foi versionado no *GitHub* para controle de alterações e rastreabilidade.

2.10 REPRODUTIBILIDADE

O fluxo computacional foi concebido para garantir reprodutibilidade, rastreabilidade e flexibilidade. Todos os scripts operaram de forma automatizada e parametrizável, sem caminhos fixos, o que permite replicar o processamento para diferentes talhões, anos e culturas apenas alterando variáveis de configuração (`CONFIG`). A estrutura de pastas, a nomenclatura dos arquivos e a organização dos artefatos foram criadas dinamicamente pelos scripts (ver Seção 2.9).

A execução completa parte do *shapefile* bruto do monitor de colheita e do polígono do talhão, processando inspeção, pré-processamento, análise geoestatística, validação e sensibilidade de modo sequencial e auditável. Cada etapa registra *logs*, parâmetros efetivamente utilizados, data/hora, ambiente e versões das bibliotecas. Exemplos: `3_resultados/<talhao_lower>_<ano>/logs/execucao.log` e `3_resultados/<talhao_lower>_<ano>/logs/parametros_execucao.json`. A única componente pseudoaleatória é a partição da validação cruzada k = 5, `shuffle=True`, controlada por `seed=42`. Produtos intermediários necessários à auditoria, incluindo o par observado vs. predito, são salvos em `.npz` e `.csv` (por exemplo, `pred_obs_<talhao_lower>_<ano>_pepitaAuto.npz`).

Para reproduzir integralmente os resultados, foram necessários disponibilizar, o *shapefile* bruto do talhão/ano (`1_dados/brutos/Export_<talhao_lower>_<ano>/doc/`), o polígono do talhão, os quatro *scripts* do projeto e as configurações do dicionário `CONFIG` em `pipeline_geoestatistico_2025.py` (ano, talhão, parâmetros de ajuste e interpolação). As exigências mínimas de *software* e as versões exatas encontram-se na Seção 2.9 e nos arquivos de diagnóstico. O código-fonte está versionado e pode ser disponibilizado mediante solicitação justificada por fins de reprodutibilidade científica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DISTRIBUIÇÃO PÓS-FILTRO E CONSISTÊNCIA EXTERNA

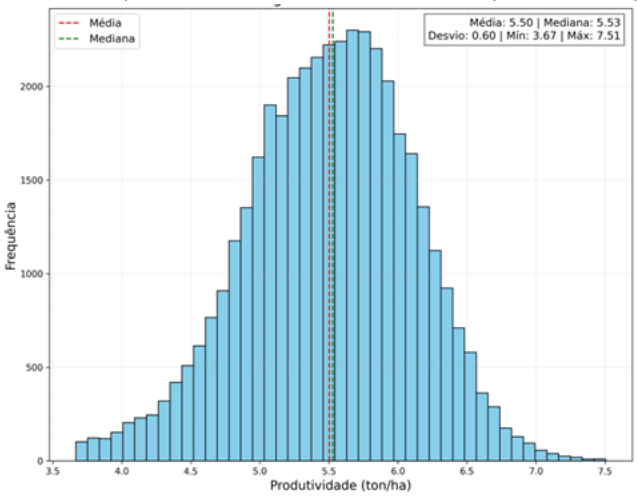
Após a aplicação dos filtros determinísticos, o conjunto do talhão Silo/2025 resultou em N = 41.473 observações válidas. A distribuição de produtividade apresentou-se essencialmente unimodal, com leve assimetria à direita; a proximidade entre a média (5,50 t ha^{-1}) e a mediana (5,53 t ha^{-1}) indica que a filtragem reduziu a influência dos extremos sem deslocar a tendência central, preservando a representatividade do conjunto para as análises subsequentes.

A consistência externa foi confirmada pela comparação com a produtividade aferida por pesagem, que foi de 5,82 t ha^{-1}; a diferença relativa de 5,5% está dentro do intervalo esperado para sistemas de monitoramento embarcado sob variações de fluxo, condições de campo e calibração (BURKS et al., 2004; DEERE e COMPANY, 2018; GAUCI et al., 2024). Com esse nível de concordância, o conjunto pós-filtro mostrou-se apropriado para o ajuste variográfico, a

ISBN 978-65-990392-6-3

krigagem e a leitura dos mapas de produtividade. A Figura 6 mostra o histograma da produtividade pós-filtro com as linhas de média e mediana.

Figura 6. Histograma da produtividade pós-filtro no talhão Silo. Linha vermelha indica a média (5,50 t ha⁻¹) e a linha verde a mediana (5,53 t ha⁻¹).

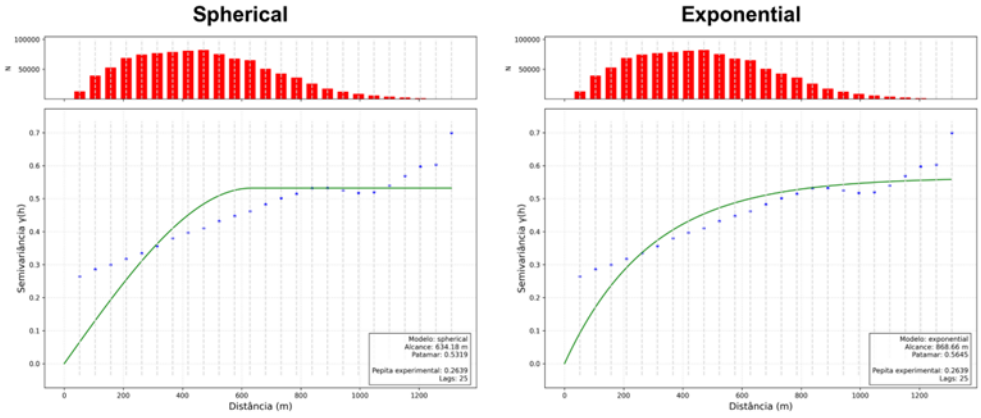


Fonte: Autores (2025).

3.2 ESTRUTURA ESPACIAL E SELEÇÃO DO MODELO

O semivariograma experimental, calculado com 25 *lags* de forma omnidirecional, evidenciou dependência espacial marcada da produtividade corrigida, com efeito pepita em torno de 5% do patamar e alcance de 868,7 m, compatível com a escala do talhão. A relação pepita/patamar e o alcance estimado são critérios clássicos para avaliação da dependência espacial em geoestatística. Entre os modelos testados, o exponencial apresentou o menor erro na validação *k-fold*, superando marginalmente o esférico, enquanto o gaussiano foi reprovado no ajuste variográfico. Os parâmetros consolidados utilizados nas etapas subsequentes foram apresentados na Tabela 2: para o modelo exponencial, pepita de 0,028 t² ha⁻², patamar de 0,565 t² ha⁻² e alcance de 868,7 m; para o esférico, pepita de 0,027 t² ha⁻², patamar de 0,532 t² ha⁻² e alcance de 634,2 m. Esses resultados, alinhados à literatura de geoestatística, sustentam a adoção do modelo exponencial pela combinação de desempenho estatístico e estabilidade operacional (MATHERON, 1963; JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978; ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989; WEBSTER e OLIVER, 2007).

Figura 7. Semivariograma experimental e modelos ajustados para os casos esférico e exponencial (25 *lags*, omnidirecional).



Fonte: Autores (2025).

3.3 MAPA DE PRODUTIVIDADE E LEITURA ESPACIAL

A Figura 3 apresenta um padrão espacial heterogêneo no talhão Silo, com manchas de produtividade que se estendem por centenas de metros, compatíveis com o alcance estimado do modelo exponencial (aproximadamente 869 m). A superfície foi obtida por krigagem ordinária, em grade regular de 5 m, restrita ao interior do polígono do talhão; predições negativas ocasionais foram truncadas para 0 t ha^{-1} por consistência física.

As transições graduais entre áreas de maior e menor produtividade, sem descontinuidades artificiais, reforçam a presença de dependência espacial estruturada e coerente com o variograma ajustado. Esse arranjo evidencia zonas com desempenho contrastante e continuidade suficiente para embasar o delineamento de unidades de manejo e a priorização de intervenções agronômicas, em conformidade com a literatura de geoestatística aplicada à agricultura de precisão (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989; WEBSTER e OLIVER, 2007), sustentando decisões de manejo ao destacar áreas prioritárias para diagnóstico e intervenção.

3.4 VALIDAÇÃO K-FOLD E SENSIBILIDADE ENTRE MODELOS

A robustez preditiva do modelo geoestatístico ajustado foi avaliada por validação cruzada *k-fold* ($k = 5$), sintetizada na Tabela 3. O erro quadrático médio (RMSE) foi de 0,6 t ha^{-1}, equivalente a aproximadamente 11% da média dos dados pós-filtro, enquanto o coeficiente de determinação (R^2) atingiu 0,241, valor adequado para aplicações operacionais em nível de talhão. A comparação entre os modelos de semivariograma indicou diferenças marginais entre as estruturas exponencial e esférica, com leve superioridade do exponencial devido ao menor RMSE. O modelo gaussiano foi descartado por apresentar desempenho inferior. A estabilidade das métricas e a consistência do modelo selecionado frente à análise de sensibilidade são evidenciadas na Figura 4, apresentada em formato de gráfico radar. O critério de seleção priorizou o RMSE, com análise complementar do R^2, em conformidade com as recomendações de KUHN e JOHNSON (2013), LI e HEAP (2014) e HENGL et al. (2018), que ressaltam a importância de múltiplos indicadores para validação preditiva em geoestatística.

4 CONCLUSÃO

O conjunto pós-filtro apresentou consistência externa, com diferença de 5,5% entre a média do monitor e a produtividade aferida por pesagem, e a análise evidenciou dependência espacial da produtividade em escala intra-talhão. O modelo variográfico exponencial mostrou o melhor ajuste e, ao parametrizar a krigagem ordinária, gerou uma superfície coerente, compatível com o alcance variográfico estimado de 868,7 m, e desempenho preditivo adequado ao uso operacional (RMSE 0,60 t ha^{-1}; R^2 0,241).

A integração de filtros determinísticos, validação *k-fold* e registro sistemático de execução conferiu robustez e reprodutibilidade ao pipeline geoestatístico. Os mapas resultantes oferecem uma base objetiva para o delineamento de zonas de manejo e para a priorização de diagnósticos e intervenções no talhão Silo, reforçando a utilidade da geoestatística para aumentar a eficiência e a sustentabilidade da produção.

REFERÊNCIAS

ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507.

AMADO, T. J. C. et al. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Embrapa, 2007.

BURKS, T. F.; SHEARER, S. A.; FULTON, J. P.; SOBOLIK, C. J. Effects of time-varying inflow rates on combine yield monitor accuracy. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 20, n. 3, p. 269–275, 2004. DOI: 10.13031/2013.16063. Acesso em: 14 ago. 2025.

CLIMATE-DATA. **Clima André da Rocha: temperatura, tempo e dados climatológicos de André da Rocha (Brasil)**. 2024. Disponível em: https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/andre-da-rocha-313472/. Acesso em: 26 ago. 2025.

CRUZ, J. C.; SOUZA, E. F. C.; ALVAREZ, R. C. F.; CRUZ, I.; SEDIYAMA, C. S. **Milho**: tecnologia e produção. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2011. 568 p.

DEERE & COMPANY. **ActiveYield – Quick Reference Guide**. Moline: Deere & Company, 2018. Disponível em: https://www.deere.com/assets/pdfs/common/qrg/active-yield.pdf.Acesso em: 14 ago. 2025.

GAUCI, A. A.; FULTON, J. P.; LINDSEY, A.; et al. Precision of grain yield monitors for use in on-farm research strip trials. **Precision Agriculture**, 2024. DOI: 10.1007/s11119-023-10092-y. Acesso em: 14 ago. 2025.

GOMES, A. D.; SANTOS, P. H. L. dos; NASCIMENTO, J. M.; ARCOVERDE, S. N. S.; SECRETTI, M. L.; COSTA, E. G. da. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo e produtividade da soja. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, v.18, n.2, 2022.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. de; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. de C. et al. (Ed.). **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 74-83.

HENGL, T.; NUSSBAUM, M.; WRIGHT, M. N.; HEUVELINK, G. B. M.; GRÄLER, B. Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables. **PeerJ**, v. 6, e5518, 2018. DOI: 10.7717/peerj.5518.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining Geostatistics**. London: Academic Press, 1978.
KUHN, M.; JOHNSON, K. **Applied Predictive Modeling**. New York: Springer, 2013. DOI: 10.1007/978-1-4614-6849-3.

LI, J.; HEAP, A. D. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. **Environmental Modelling & Software**, v. 53, p. 173–189, 2014. DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.12.008.

MÄLICKE, M. et al. SciKit-GStat 1.0: a SciPy-flavored geostatistical variogram estimation toolbox written in Python. **Geoscientific Model Development**, v. 15, p. 2505–2524, 2022. DOI: 10.5194/gmd-15-2505-2022.

MATHERON, G. **Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature**. França: Masson, 1965.

MATHERON, G. Principles of geostatistics**. Economic Geology**, v. 58, n. 8, p. 1246–1266, 1963. DOI: 10.2113/gsecongeo.58.8.1246.

MATHERON, G. **Traité de géostatistique appliquée**. França: Editions Technip, 1962–1963.
MURRAY, L.; SHAH, A.; GRIFFITHS, J. PyKrige: Kriging Toolkit for Python. **Journal of Open Source Software**, v. 3, n. 29, p. 501, 2018. DOI: 10.21105/joss.00501.

ISBN 978-65-990392-6-3

OLIVEIRA, F. A. de; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H. **Variabilidade espacial da produtividade da soja e da condutividade elétrica de um Latossolo Bruno**. Embrapa Soja, 2011.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

SANTANA, D. M. de; MACEDO, V. R. A.; DALTO, P. H.; CAPRA, L. T.; SENA, V. G. L. Componentes de produção da soja em função da variabilidade espacial dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho eutrófico. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, 2024.

SILVA, A. L. G. da. **Variabilidade espacial da produtividade da soja e dos atributos do solo: diagnóstico de influência local utilizando o modelo geoestatístico WAVE**. Cascavel: UNIOESTE, 2024. Dissertação de Mestrado.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for Environmental Scientists**. 2. ed. Chichester: Wiley, 2007. DOI: 10.1002/9780470517277.



CAPÍTULO 55

DIAGNÓSTICO DO MONITORAMENTO DAS PERDAS NA COLHEITA DA SOJA NO PARANÁ – SAFRA 2024/2025

Diagnosis of loss monitoring in soybean harvest in Paraná – Season 2024/2025

Anderson de Toledo[1]; Hevandro Colonhese Delalibera[1]; Edivan José Possamai[1]

[1] Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IDR-Paraná, Rod. Celso Garcia Cid, km 375, CEP 86.047-902, Londrina – Paraná, Brasil, anderson@idr.pr.gov.br, hevandro@idr.pr.gov.br, edivanjp@idr.pr.gov.br

RESUMO

O Monitoramento Integrado da Colheita da Soja (MIC-Soja) é uma iniciativa que visa promover boas práticas na colheita, por meio da divulgação do diagnóstico realizado no levantamento das perdas de grãos durante a colheita da soja no estado do Paraná. Este trabalho tem como objetivo divulgar um diagnóstico dos resultados do MIC-Soja para a safra 2024/2025, com base nas amostragens de perdas na colheita realizadas em 219 áreas produtivas distribuídas em 47 municípios no estado do Paraná. Neste levantamento, foram coletadas as seguintes informações: área do talhão e área total cultivada, produtividade estimada, município, cultivar de soja, data da amostragem, nome do fabricante, modelo, ano de fabricação e largura da plataforma de corte da colhedora, se é própria ou terceirizada e, o custo de terceirização, se o operador realizou treinamento e em que ano. Foi constatado que as perdas de grãos tiveram aumento expressivo no decorrer das safras no Estado, com média de 1,28 sc/ha (76,8 kg/ha) para a safra 2024/25, próxima a 2% da produtividade estadual, de 61,53 sc/ha (3.692 kg/ha).

Palavras-chave: Colhedora. Desperdício. Produção agrícola.

ABSTRACT

The Integrated Monitoring of Soybean Harvest (MIC-Soja) is an initiative that aims to promote good practices in the harvest, through the dissemination of the diagnosis obtained by the survey of grain losses during soybean harvest in the state of Paraná. The objective of this work is to disclose a diagnosis of the results from the MIC-Soja for the 2024/2025 season, based on harvest loss samples in 219 productive areas distributed in 47 municipalities in the state of Paraná. In this survey, the following information was collected: field area and total cultivated area, estimated productivity, municipality, soybean cultivar, sampling date, manufacturer's name, model, year of manufacture and width of the harvester cutting platform, owned or outsourced combine, whether the operator has been training and in what year. It was found that grain losses significantly increased throughout the seasons, with an average of 1.28 sc/ha (76.8 kg/ha) for the 2024/25 season, near 2% of Paraná estimated productivity, that was 61.53 sc/ha (3,692 kg/ha).

Keywords: Harvester. Losses. Grain production.

ISBN 978-65-990392-6-3

1. INTRODUÇÃO

Segundo projeções da Organização das Nações Unidas (UNITED NATIONS, 2025), estima-se que a população mundial será de 8,5 bilhões de pessoas até 2030 e de 9,7 bilhões em 2050, com a previsão de que mais da metade do incremento populacional entre 2022 e 2050 estará concentrado em apenas oito países, na África e no sul e sudeste Asiático.

Para atender a demanda por alimentos para essa população crescente, invariavelmente se faz necessário o aumento da produção agropecuária a nível mundial. Assim, é inegável o papel do Brasil neste cenário, como um dos principais países na produção e exportação de grãos, frutas e proteínas em nível global.

A soja (*Glycine max* L.) é uma das principais culturas de grãos, com estimativa de produção mundial de mais de 420 milhões de toneladas em mais de 146 milhões de hectares na safra 2024/25. A produção de soja no Brasil, o maior produtor mundial da oleaginosa, atingiu nesta safra 169,49 milhões de toneladas em 47,61 milhões de hectares plantados, com produtividade média de 59,3 sc/ha (3.560 kg/ha), conforme informações divulgadas pela Embrapa (2025).

Segundo a CONAB (2025), estes números da safra 2024/25 representam um recorde de produção, sendo 14,8% superior à da safra 2023/24 e 9% superior ao recorde anterior, obtido na safra de 2022/23.

A produção de soja no Estado do Paraná contribui com aproximadamente 13% do total da produção nacional, estimada em 21,1 milhões de toneladas na safra atual em uma área de 5,76 milhões de hectares, sendo o segundo maior produtor da cultura, atrás apenas do Mato Grosso, que tem participação de 32% no total nacional (SEAB, 2025a; 2025b).

A relevância econômica da soja é percebida tanto nas cifras de produção e exportação quanto nos impactos na economia brasileira, desempenhando papel fundamental no equilíbrio da balança comercial, impulsionando a criação de empregos em toda a sua cadeia produtiva e estimulando o crescimento de diversas indústrias relacionadas (DELALIBERA et al., 2024).

Considerando a área de produção da soja no Paraná, estimada em 5,76 milhões de hectares (SEAB, 2025b), uma redução das perdas na colheita de 0,5 sc/ha poderia representar um acréscimo de 2,88 milhões de sacas ou 174 mil toneladas do grão na cadeia produtiva. Com base na cotação divulgada pelo indicador da soja Cepea/Esalq para o Paraná, o valor da saca de 60 kg em 29/08/2025 foi de R$134,25 (CEPEA, 2025). Desta forma, essa redução estimada das perdas poderia representar um ingresso adicional direto de receitas superior a R$386 milhões no ano para a economia estadual.

Carreira et al. (2024) afirmam que as perdas de grãos na colheita mecanizada, principalmente em países em desenvolvimento, podem representar uma ameaça à sustentabilidade na agricultura, sendo crucial seu monitoramento.

Dentre os fatores que podem influenciar nas perdas na colheita mecanizada de soja, podem-se citar a altura de corte da plataforma da colhedora, a velocidade do molinete, a rotação do cilindro trilhador, a abertura entre cilindro e côncavo, e a velocidade de deslocamento. Em relação aos fatores ligados às perdas de grãos não oriundos do processo de colheita mecanizada, podem-se citar a deiscência das vagens, a semeadura inadequada, a escolha errada da cultivar, a ocorrência de plantas daninhas, o mau desenvolvimento da cultura e também fatores climáticos (TOLEDO et al., 2008). Além disso, grãos de soja não colhidos podem dar origem a plantas espontâneas, de difícil controle e que multiplicam a ferrugem da soja, outras doenças e pragas, causando prejuízos indiretos à cadeia produtiva (DELALIBERA et al., 2024).

Assim, as perdas ocorridas durante os processos de colheita até a pós-colheita são preocupantes, pois geram prejuízos consideráveis à cadeia. Conforme estimativa da CONAB (2021), as perdas ocorridas na pós-colheita variam de 0,93 a 1,53% da produção nacional,

ISBN 978-65-990392-6-3

dependendo principalmente do tempo de armazenamento dos grãos, embora o transporte em estradas corresponda a 0,63% destas perdas.

As perdas durante a colheita, seja na forma de deiscência natural, pelo acamamento das plantas, na plataforma durante o corte e o recolhimento da massa de plantas ou durante o processo de trilha, separação e limpeza, podem variar de 1,7% a 14,5% do total da produtividade (DELALIBERA et al., 2024).

Nas lavouras de soja, as perdas durante a colheita mecanizada frequentemente excedem o limite recomendado pela Embrapa Soja de uma saca (60 kg) por hectare. Isso se deve, em grande parte, à má regulagem e conservação das colhedoras, às velocidades de deslocamento excessivamente altas, às condições da lavoura e, por fim e principalmente, à capacitação dos operadores (MESQUITA et al., 2011).

Dada a multiplicidade de causas que contribuem para as perdas na colheita da soja, é importante monitorar e quantificar os fatores a estas relacionados, uma vez que impactam diretamente a rentabilidade da produção. A quantificação das perdas permite ao produtor realizar ajustes em seu processo de operação, aumentando a eficiência e, consequentemente, a lucratividade da lavoura.

Portanto, este trabalho tem como objetivo divulgar um diagnóstico dos resultados do Monitoramento Integrado da Colheita da Soja (MIC-Soja) para a safra 2024/2025, com base nas amostragens de perdas na colheita realizadas em 219 áreas produtivas distribuídas em 47 municípios no estado do Paraná.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O Monitoramento Integrado da Colheita da Soja (MIC-Soja) foi estabelecido durante a safra 2018/2019 no estado do Paraná, e vem sendo realizado em toda safra desde então, por meio de uma ação conjunta entre o Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IAPAR-EMATER (IDR-Paraná) e a Embrapa Soja, com o intuito de quantificar e identificar os eventuais fatores que contribuem para as perdas de grãos durante o processo de colheita.

O MIC-Soja é uma iniciativa que visa promover boas práticas na colheita, por meio da divulgação do diagnóstico realizado no levantamento das perdas de grãos durante a colheita da soja no estado do Paraná.

2.1 ÁREA DE ESTUDO

Por se tratar de um processo colaborativo, com a participação dos agricultores e extensionistas neste levantamento, a cada safra são realizadas amostragens em diversas áreas produtivas em todo o estado do Paraná. Na safra 2024/2025 foram realizadas 219 amostragens, distribuídas em 47 municípios em 15 regionais de atuação do IDR-Paraná, totalizando 3.800 hectares de área amostral (Tabela 1).

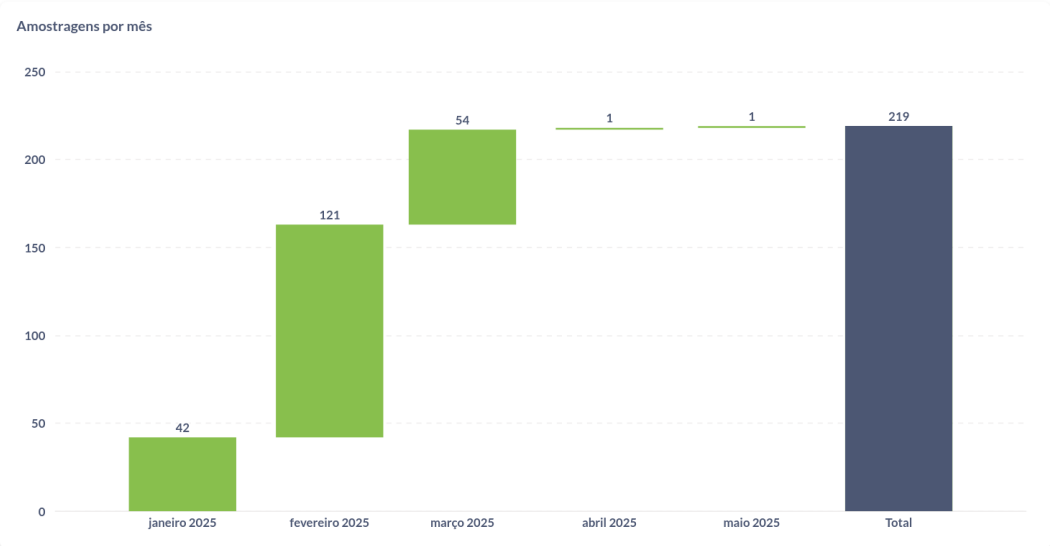
Na Figura 1 está representada graficamente a distribuição temporal das avaliações de perdas na colheita realizadas em cada mês durante a safra 2024/2025, sendo 42 amostragens realizadas em janeiro, 121 em fevereiro 54 em março, uma em abril e uma última em maio.

Tabela 1 - Número de municípios, quantidade de amostras e área amostrada por regional do IDR-Paraná no MIC-Soja safra 2024/2025

Regional	Municípios	Amostragens	Área amostrada (ha)
Apucarana	1	5	40
Campo Mourão	6	28	418
Cascavel	2	15	175
Cianorte	1	10	322
Cornélio Procópio	2	6	50
Dois Vizinhos	3	15	168
Francisco Beltrão	5	20	365
Guarapuava	1	7	43
Irati	1	5	66
Laranjeiras do Sul	6	14	123
Londrina	1	3	80
Maringá	7	39	1.087
Pato Branco	5	14	191
Ponta Grossa	4	19	263
Toledo	2	19	408
Total	**47**	**219**	**3.800 ha**

Fonte: Autores (2025)

Figura 1. Período de realização das avaliações do MIC-Soja Safra 2024/2025.



Fonte: Autores (2025)

2.1 COLETA, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Para o levantamento e registro das amostragens realizadas a campo pelos extensionistas do IDR-Paraná, foi definido um protocolo técnico para o MIC-Soja, que contém as instruções básicas para avaliação das perdas na colheita utilizando a metodologia definida no trabalho, bem como uma ficha de campo para anotação das informações referentes ao

ISBN 978-65-990392-6-3

talhão avaliado, à máquina que realizou a colheita e respectivo operador e às amostras de perdas na colheita.

Neste trabalho, as seguintes variáveis foram registradas, relativas à área de estudo: área do talhão amostrado (ha), área total cultivada (ha), produtividade estimada (sc/ha). Também são registradas informações quanto ao município, cultivar de soja e data da amostragem.

Referente à máquina, são coletadas as seguintes informações: nome do fabricante, modelo da colhedora, ano de fabricação, largura da plataforma de corte, se é máquina própria ou terceirizada e, neste caso, o custo de terceirização em R$/ha. Além disso, registra-se se o operador realizou curso de operação e regulagem de colhedoras e, caso positivo, o ano em que participou do treinamento. As informações coletadas sobre a máquina e o operador tem como objetivo auxiliar na interpretação dos possíveis fatores que podem afetar as perdas na colheita.

O procedimento de amostragem das perdas foi baseado no método de estimativa das perdas de grãos utilizando o copo medidor de perdas na soja da Embrapa (Figura), conforme descrito em Silveira et al. (2024).

O Copo Medidor da Embrapa (Figura 2), desenvolvido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa na década de 1980, é uma ferramenta eficaz para determinar a quantidade de grãos que não estão sendo coletados pela colhedora. O método é considerado rápido, prático e eficiente, não requerendo a interrupção da operação de colheita, tornando-se uma ferramenta prática e eficaz para diagnosticar as perdas de grãos que ocorrem durante a colheita e assim tomar as medidas necessárias para reduzi-las (DELALIBERA et al., 2024).

Figura 2. Copo medidor e armação utilizados no método de estimativa das perdas de grãos.



Legenda: A) Kit Perdas - conjunto composto por 1 Copo Medidor da Embrapa, 1 manual técnico, 1 armação em corda de 2,0 m² (4,0 m de largura x 0,5 m de comprimento) e 4 hastes metálicas para fixação da armação no solo; e, B) Uma caixa personalizada acondiciona 2 conjuntos.
Fonte: Delalibera et al. (2024)

Nesta metodologia, a área delimitada para a coleta de grãos perdidos é de 2,0 m², ajustado a dimensão de comprimento da armação com base na largura da plataforma de corte da colhedora. No entanto, é importante considerar que armações com comprimento inferior a 0,22 m, ou seja, avaliações em plataformas com tamanho superior a 30 pés (9,1 m de largura), podem dificultar o manuseio da palhada dentro da armação, reduzindo a precisão na medição (SILVEIRA et al., 2024).

O procedimento consiste em colocar a armação após a passagem da colhedora, coletando todos os grãos dispostos no chão (soltos e dentro de vagens) dentro da área da armação, depositando-os no Copo Medidor que, por meio de uma escala, identifica a perda e/ou o desperdício naquele ponto amostral. Isso permite estimar as perdas totais de grãos

ISBN 978-65-990392-6-3

durante a colheita, em sacas de 60 kg/ha, unidade definida como “sc/ha”. Em todos os talhões amostrados foram coletadas três subamostras para calcular a média das perdas totais de grãos durante a colheita.

A partir da média das perdas na colheita obtida pelas amostragens a campo e da estimativa de produtividade da área, foi calculado o percentual de perdas na colheita, pela razão entre a média de perdas e a produtividade estimada (conforme a Equação 1), como forma de padronizar esta informação e permitir a análise comparativa entre as localidades avaliadas:

$$P\% = \frac{(\sum_{i=1}^{n} a_i)/n}{Y} \times 100 \quad (1)$$

Onde: $P\%$ = perdas percentuais; n = número de amostragens de perdas; a = valor amostral de perda na colheita em sc/ha obtido no ponto i; Y = produtividade estimada em sc/ha.

Todos os dados coletados pelos extensionistas do IDR-Paraná no trabalho de campo foram digitalizados utilizando um formulário do *Google Forms* preenchido pelos próprios técnicos. Em seguida, estes dados foram exportados para uma planilha em arquivo formato CSV (*Comma Separated Values*), que passaram por uma verificação de consistência e correção de possíveis erros de digitação, e posteriormente convertidos para um arquivo de banco de dados SQL (*Structured Query Language*) gerenciado no programa PostgreSQL. A partir deste banco de dados SQL, foi utilizada a versão *Open Source* do programa *Metabase* para realizar as análises exploratórias e geração dos gráficos apresentados no trabalho.

Os resultados obtidos nesta safra e anteriores estão sendo analisados e preparados para disponibilização pelo IDR-Paraná por meio da plataforma de dados *Metabase*, que permite a criação de painéis dinâmicos e interativos para consulta online, com o intuito de fornecer informações que conscientizem e auxiliem os agricultores na redução das perdas na colheita no estado do Paraná.

Ressalta-se que análises estatísticas mais aprofundadas (como comparação de médias e de regressão) ainda não foram realizadas, tratando-se apenas de análise exploratória dos dados obtidos nas amostragens de campo, como forma de apresentação de resultados preliminares.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

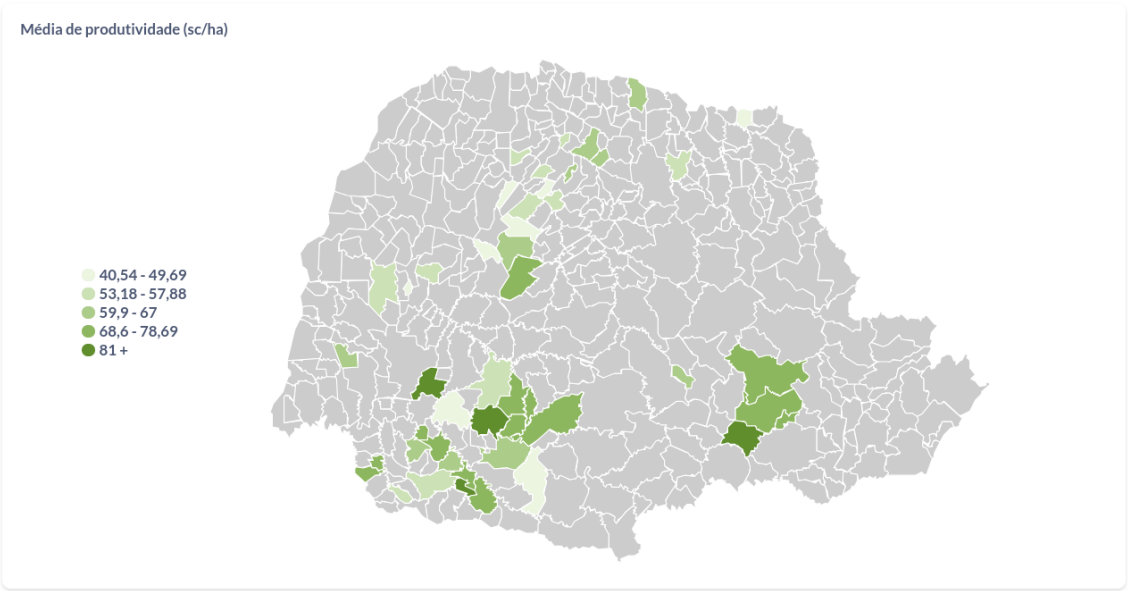
Os resultados exibidos nos gráficos das figuras apresentadas neste trabalho foram gerados a partir do banco de dados SQL utilizando o programa de análise de dados *Metabase*. Estes gráficos fazem parte da plataforma online que está sendo desenvolvida pelo IDR-Paraná para disponibilização pública dos resultados do programa MIC-Soja no estado do Paraná.

3.1 PRODUTIVIDADE

A média de produtividade estimada nas áreas avaliadas em cada município pode ser visualizada no mapa da Figura 3, sendo que as áreas menos produtivas apresentaram médias entre 40 e 50 sc/ha (2.400 e 3.000 kg/ha), enquanto que as mais produtivas tiveram médias superiores a 80 sc/ha (4.800 kg/ha).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 3. Distribuição espacial da média de produtividade estimada da soja (sc/ha) nos municípios avaliados.

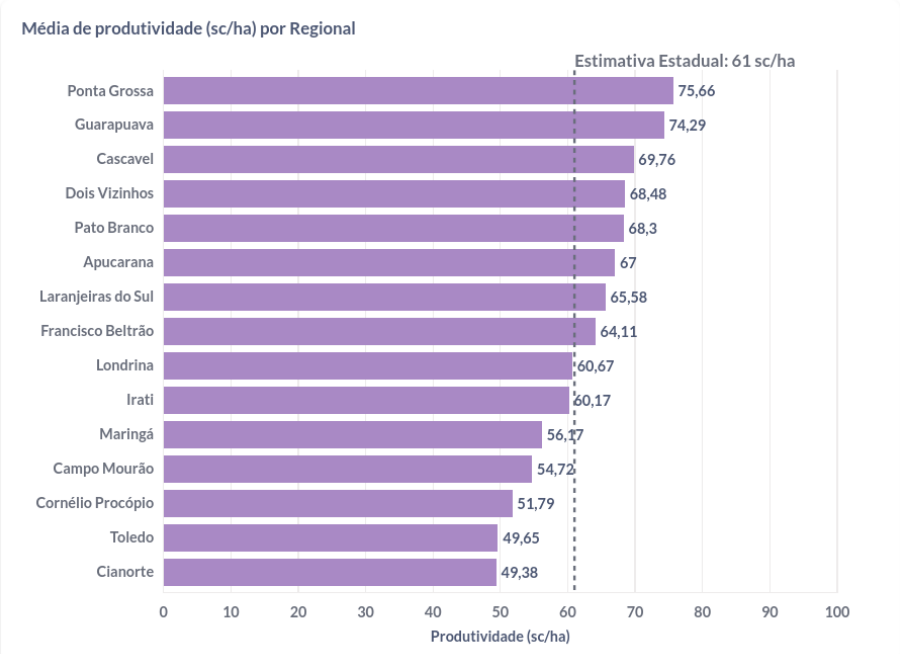


Fonte: Autores (2025)

Estes valores estão alinhados com os divulgados em pesquisa realizada por Carreira et al. (2024), que avaliou os resultados de 39 publicações sobre colheita mecanizada de soja, que registraram produtividades variando entre 2.340 e 4.861 kg/ha.

Considerando a média estadual para a produtividade estimada neste levantamento, que foi de 61,53 sc/ha (3.692 kg/ha), este valor corrobora com as estimativas divulgadas de 61,1 sc/ha (3.666 kg/ha) pela SEAB (2025b) e de 59,35 sc/ha (3.561 kg/ha) pela CONAB (2025) para o Paraná. Na Figura 4 a média da produtividade estimada está estratificada em função da regional de atuação do IDR-Paraná à qual a área amostrada está inserida.

Figura 4. Média de produtividade estimada da soja (sc/ha) por regional do IDR-Paraná.



Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

Dentre as 15 regionais que realizaram este trabalho, a que obteve maior média foi Ponta Grossa, com produtividade estimada em 75,66 sc/ha e a menor foi a regional de Cianorte, com 49,38 sc/ha.

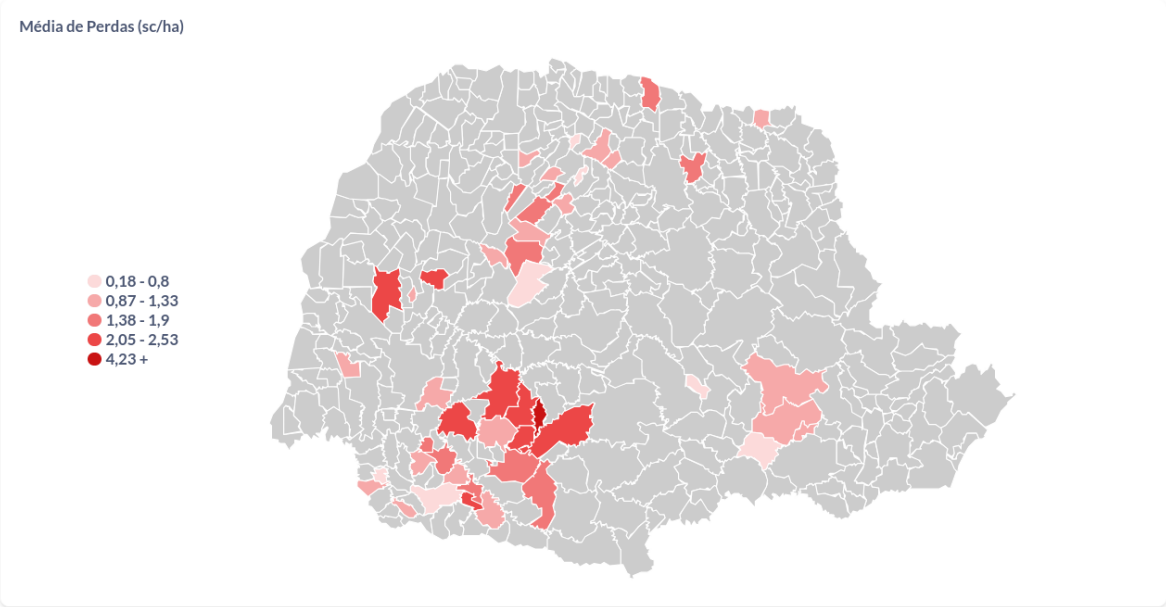
Destas regionais, sete delas tiveram produtividade média inferior à estimada para o Estado, de 61,1 sc/ha (3.666 kg/ha), pelo Departamento de Economia Rural da Secretaria da Agricultura e do Abastecimento - DERAL/SEAB, conforme divulgado no boletim mensal de estimativa de safra (SEAB, 2025b) para o mês de julho de 2025.

3.2 PERDAS NA COLHEITA

As médias de perdas absolutas na colheita da soja nas áreas avaliadas em cada município pode ser visualizada no mapa da Figura 5, em que os municípios com as menores médias obtiveram valores abaixo de 1 sc/ha (60 kg/ha). Este valor é considerado o nível de tolerância de perdas na colheita, conforme recomendado pela Embrapa Soja em Silveira et al. (2024), constatando-se que estes locais estão com baixo níveis de perdas na colheita.

Contudo, a média estadual para esta variável nesta safra foi de 1,28 sc/ha (76,8 kg/ha), mesmo valor encontrado no levantamento realizado na safra 2022/23, indicando que as medidas de conscientização e estratégias para redução das perdas na colheita estão sendo pouco efetivas. Além disso, como já registrado por Delalibera et al. (2024), houve significativo aumento das perdas em comparação com os levantamentos realizados nas safras de 2018/19 e 2019/20, cujas médias foram de 1,05 e 1,17 sc/ha (63 e 70,2 kg/ha).

Figura 5. Distribuição espacial da média de perdas na colheita da soja (sc/ha) nos municípios avaliados.



Fonte: Autores (2025)

O valor excedente de 0,28 sc/ha (16,8 kg/ha) em relação ao nível de tolerância de perdas recomendado pela Embrapa Soja, configura o desperdício de grãos que poderia ter sido evitado durante a colheita de soja no Estado. Extrapolando-se para a produção estadual, que foi de 21,1 milhões de toneladas em 5,75 milhões de hectares, tem-se um desperdício da ordem de 1,61 milhão de sacas, ou aproximadamente 96,7 mil toneladas de grãos somente na safra 2024/25.

ISBN 978-65-990392-6-3

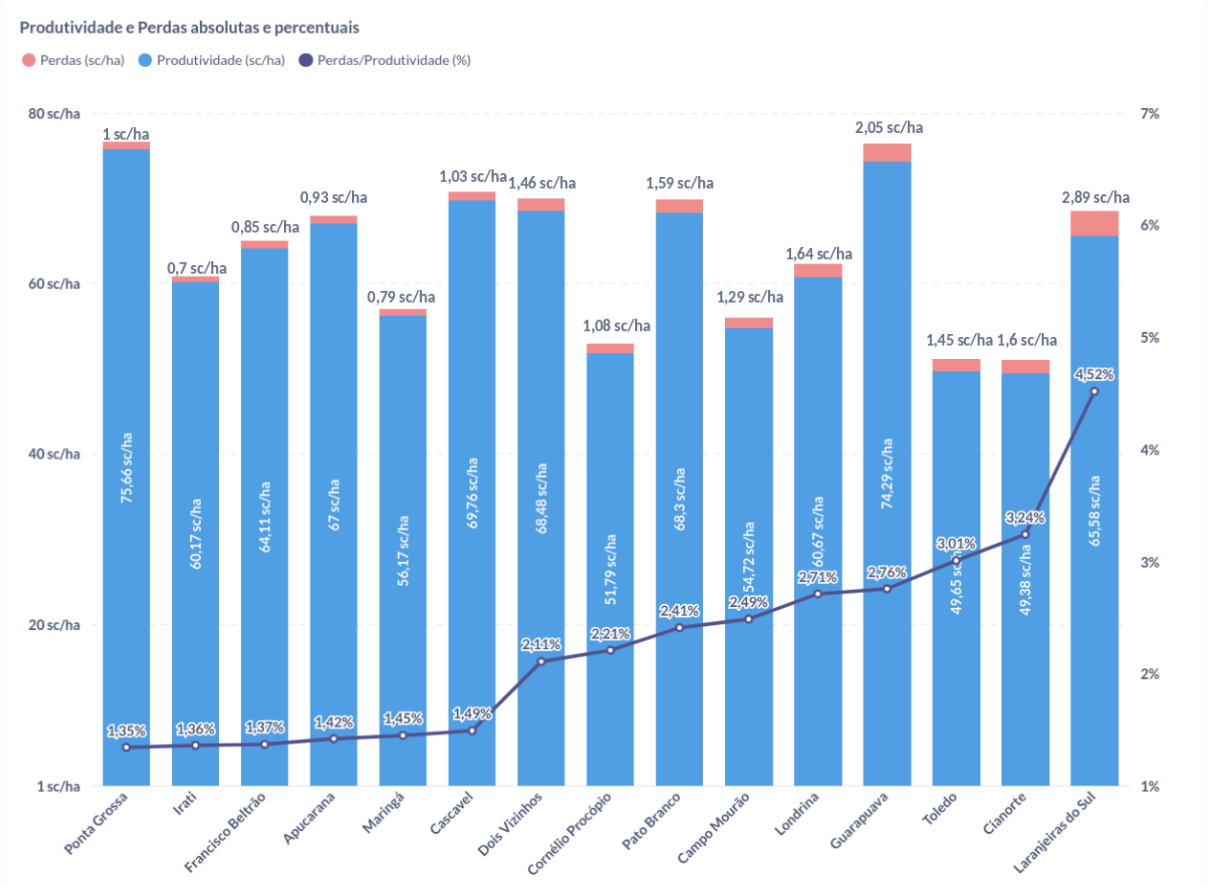
Na maioria dos municípios, a média de perdas ficou abaixo de 2,5 sc/ha (150 kg/ha), sendo que apenas no município de Virmond, pertencente à regional de Laranjeiras do Sul, as perdas foram superiores a este valor, chegando à média de 4,23 sc/ha (253,8 kg/ha).

Na Figura são apresentadas as médias de perdas absolutas (sc/ha) e de perdas percentuais relativas à produtividade estimada em função da regional. Verifica-se que as regionais de Apucarana, Cascavel, Cornélio Procópio, Francisco Beltrão, Irati, Maringá e Ponta Grossa tiveram resultados de perdas iguais ou inferiores a 1 sc/ha (60 kg/ha). A média de perdas apenas nestas regionais foi de 0,89 sc/ha (53,4 kg/ha), considerada como aceitável (SILVEIRA et al., 2024).

As demais regionais que participaram do levantamento (Campo Mourão, Cianorte, Dois Vizinhos, Guarapuava, Laranjeiras do Sul, Londrina, Pato Branco e Toledo) apresentaram médias de perdas superiores ao limite tolerável. Para estas regionais a média de perdas foi de 1,67 sc/ha (100,2 kg/ha), 30% acima da média estadual de 1,28 sc/ha (76,8 kg/ha).

Referente às perdas percentuais, também visualizadas na Figura e que representam as perdas em relação à produtividade obtida em cada local de avaliação, cabe destaque para as regionais de Toledo e Cianorte, que tiveram altos percentuais de perdas, 3,01% e 3,24% respectivamente, e ainda apresentaram baixas produtividades, inferiores a 50 sc/ha, como visto na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

Figura 6. Produtividade, perdas absolutas e percentuais, por regional.



Fonte: Autores (2025)

As regionais que apresentaram os melhores resultados para esta variável foram Apucarana, Cascavel, Francisco Beltrão, Irati, Maringá e Ponta Grossa, todas com percentual de perdas inferior a 1,50%. Além disso, excetuando-se as regionais de Irati e Maringá, todas

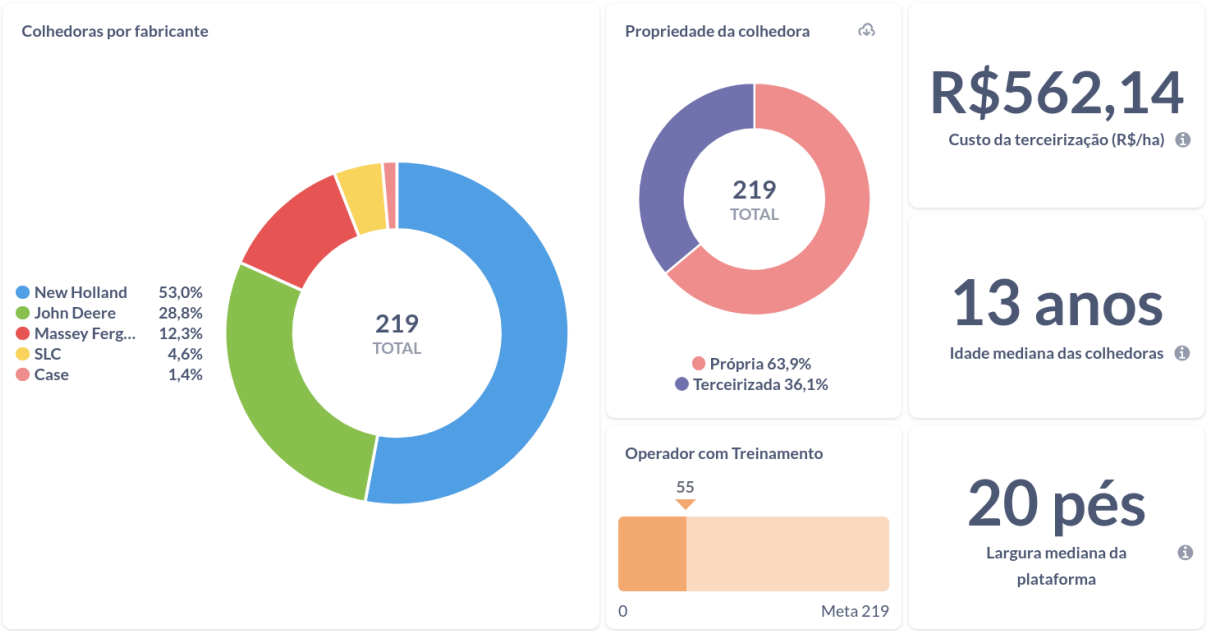
ISBN 978-65-990392-6-3

também tiverem produtividade acima da média estadual de 61,1 sc/ha. Assim, pode-se inferir que nestas regionais as perdas na colheita representam menor impacto econômico na produção de soja.

3.3 COLHEDORA E OPERADOR

As informações coletadas referentes ao fabricante, idade da máquina, largura da plataforma, propriedade da colhedora, bem como o custo de terceirização quando não se tratava de máquina própria e o número de operadores com treinamento são exibidos nos gráficos da Figura 7.

Figura 7. Informações sobre as colhedoras avaliadas no MIC-Soja Safra 2024/2025.



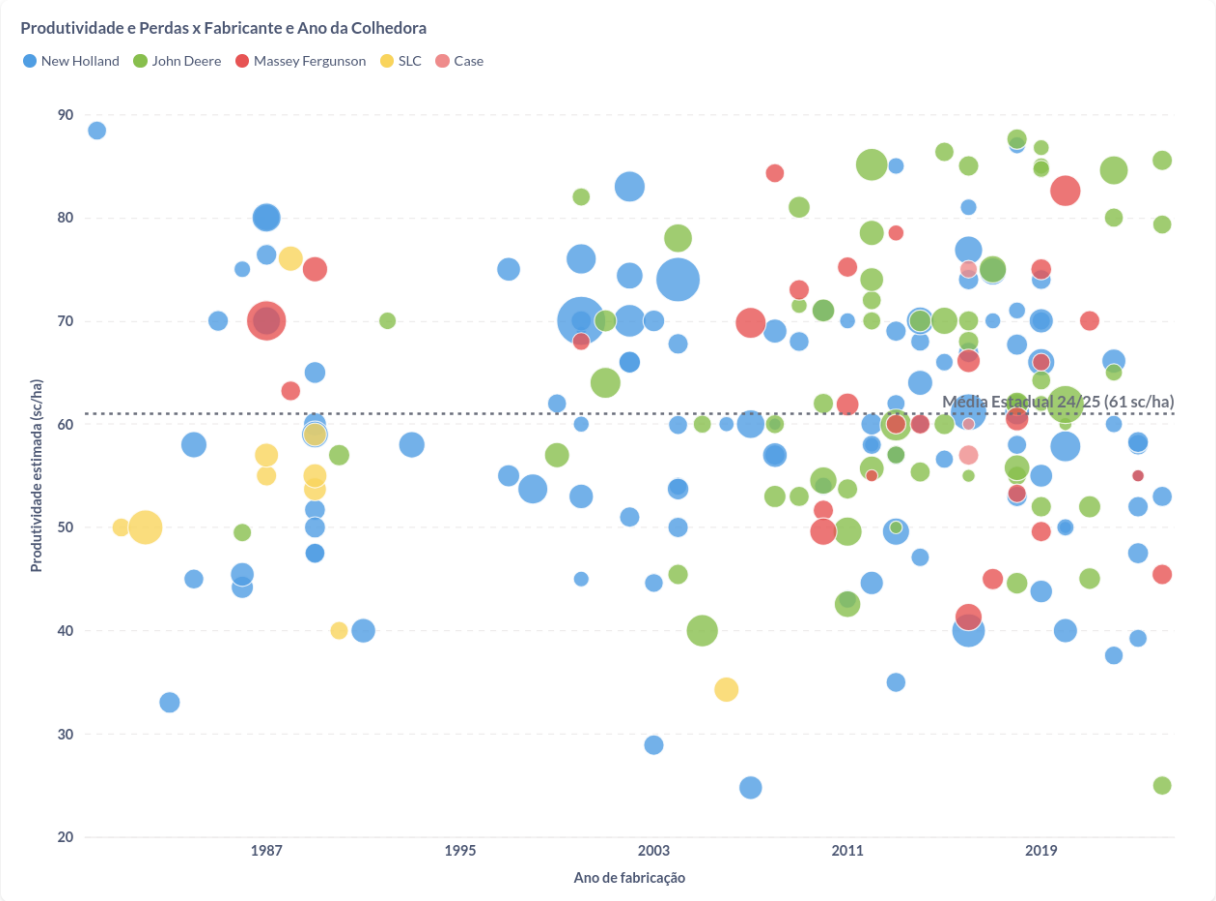
Fonte: Autores (2025)

Dentre as 219 colhedoras avaliadas, tem-se que 53% são máquinas fabricadas pela New Holland, 28,8% da John Deere, 12,3% da Massey Ferguson, 4,6% da SLC e 1,4% da Case. Destas, 63,9% ou 140 colhedoras são máquinas próprias dos agricultores e 79 são máquinas terceirizadas para a colheita, sendo que o custo médio de terceirização foi mensurado em R$562,14 por hectare. Ainda com relação às máquinas, com base no ano de fabricação tem-se que a idade mediana das colhedoras foi de 13 anos, e a largura mediana das plataformas foi de 20 pés (6 m).

A respeito do treinamento do operador em curso de regulagem e operação de colhedoras, em apenas 55 locais de amostragem informaram ter realizado, o que corresponde a 25% dos casos. Na figura 8 é apresentado o gráfico de dispersão da produtividade estimada em função do ano de fabricação da colhedora, segmentado pelo fabricante conforme as cores dos círculos e o diâmetro destes representando as perdas na colheita.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 8. Produtividade e perdas na colheita em função do ano de fabricação da colhedora e fabricante.



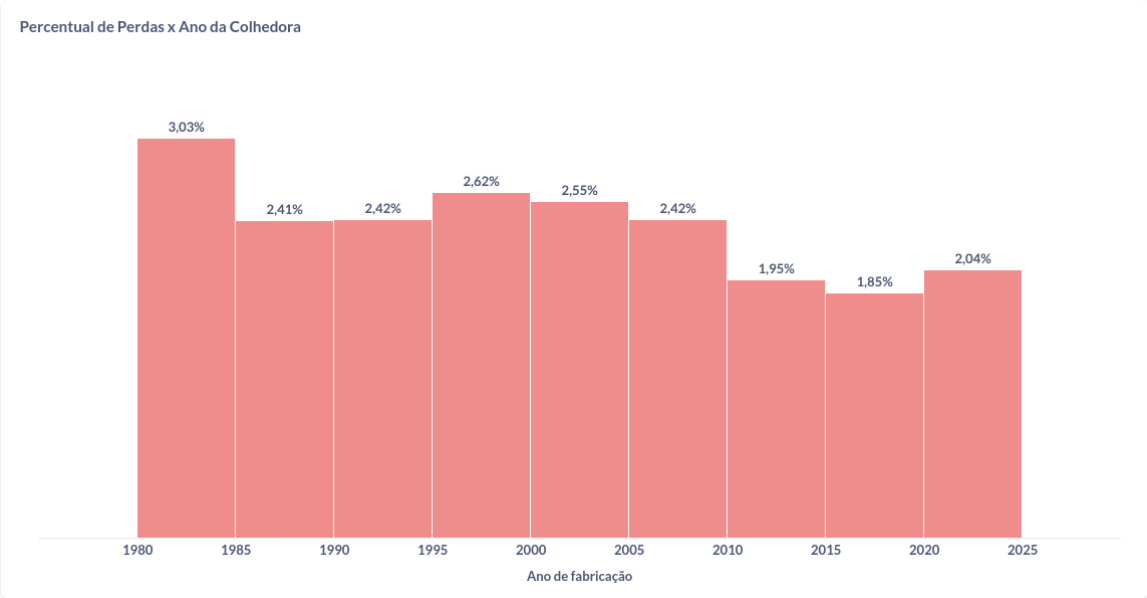
Legenda: O diâmetro do círculo representa a média das perdas na colheita e as cores o respectivo fabricante da colhedora.
Fonte: Autores (2025)

Com base nestes dados, não foi possível estabelecer uma relação entre quaisquer destas características com as variáveis mensuradas, indicando que não há influência da idade ou do modelo/fabricante da colhedora tanto na produtividade como nas perdas de grãos.

Na figura 9 é apresentada a média das perdas percentuais em função do ano de fabricação de todas as colhedoras avaliadas, agrupadas em períodos de 5 anos. Nota-se que as máquinas mais antigas, com ano de fabricação no período de 1980-1985, tiveram os maiores valores de perdas, superando 3%. Em contrapartida, máquinas fabricadas a partir de 2010 apresentaram resultados de perdas próximos ou inferiores a 2%.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 9. Percentual de perdas na colheita em função do ano de fabricação da colhedora.



Fonte: Autores (2025)

4. CONCLUSÃO

A média da produtividade estimada nos levantamentos realizados foi de 61,53 sc/ha (3.692 kg/ha) para o Estado, com os menores resultados próximos a 40 sc/ha e os mais elevados acima de 80 sc/ha, demonstrando grande variabilidade entre os municípios avaliados.

Com relação às perdas na colheita, algumas áreas avaliadas conseguiram manter médias abaixo do limite tolerável de 1 sc/ha. Contudo, boa parte dos municípios avaliados teve perdas entre 1 e 2,5 sc/ha, evidenciando o potencial de redução das perdas na colheita e a necessidade de conscientização e orientação dos produtores quanto às medidas que podem ser adotadas para reduzir esta variável.

Com base no acompanhamento histórico do MIC-Soja, pode-se verificar também que a média estadual das perdas na colheita aumentou significativamente desde a safra 2018/19 até a safra 2024/25, passando de 1,05 sc/ha para 1,28 sc/ha.

Três das regionais avaliadas (Cianorte, Laranjeiras do Sul e Toledo) tiveram perdas percentuais elevadas (acima de 3%), em comparação às demais regiões, o que pode gerar alto impacto econômico na produção destas localidades.

Com relação às colhedoras avaliadas, percebe-se uma preponderância das marcas New Holland e John Deere, com mais de 80% das máquinas destes dois fabricantes. Contudo, não exercendo influência nas variáveis analisadas. Por fim, o grupo de colhedoras com ano de fabricação entre 1980 e 1985 foi o que apresentou o maior percentual de perdas, superando os 3%.

AGRADECIMENTOS

A todos os produtores rurais que participaram das avaliações, permitindo a realização do trabalho em suas áreas produtivas e colaborando com os técnicos do IDR-Paraná e da Embrapa.

Aos técnicos, extensionistas, pesquisadores e demais colaboradores do IDR-Paraná que conduziram as avaliações a campo no período de colheita e participando ativamente do processo de levantamento destas informações.

A todos os colaboradores da Embrapa que contribuíram para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

CARREIRA, V. S.; ALEIXO, E. V.; RIBEIRO, N. M.; SANTOS, J. N.; SILVA, R. P. A systematic and meta-analytical review of soybean mechanized harvesting in South America, **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 28, n. 1, e265804, 2024.

CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Indicador da soja Cepea/Esalq**. Piracicaba: USP, 2025. Disponível em: https://www.cepea.org.br/br/indicador/soja.aspx. Acesso em: 30 ago. 2025.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira**: grãos | safra 2024/25 11º levantamento. Brasília: Conab, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/11o-levantamento-safra-2024-25/11o-levantamento-safra-2024-25. Acesso em: 28 ago. 2025.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Perdas em transporte e armazenagem de grãos**: panorama atual e perspectivas. Brasília: Conab, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/acesso-a-informacao/institucional/publicacoes/outras-publicacoes/Perdas%20em%20transporte%20e%20armanenagem%20de%20graos. Acesso em: 29 ago. 2025.

DELALIBERA, H. C.; POSSAMAI, E. J.; SILVEIRA, J. M. **Monitoramento de perdas na colheita da soja no Paraná:** Safra 2022/2023. Londrina: IDR-Paraná, 2024. 20 p. (Informe Técnico, 2).

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Soja em números (safra 2024/25)**. Brasília: Embrapa, 2025. Disponível em: https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos. Acesso em: 29 ago. 2025.

MESQUITA, C. D. M.; COSTA, N. P.; MANTOVANI, E. C.; ANDRADE, J. G.; FRANÇA NETO, J. D. B.; SILVA, J. G.; FONSECA, J. R.; GUIMARAES SOBRINHO, J. B. **Monitoramento das perdas de grãos na colheita de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 14p.

SEAB. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento. **Boletim Conjuntural Semana 24/2025**. Curitiba: Seab, 2025a. Disponível em: https://www.agricultura.pr.gov.br/Pagina/Boletim-Conjuntural-Semana-342025. Acesso em: 28 ago. 2025.

SEAB. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento. **Estimativa de Safra**: Resumo Estadual. Curitiba: Seab, 2025b. Disponível em: https://www.agricultura.pr.gov.br/safras. Acesso em: 18 ago. 2025.

SILVEIRA, J. M.; MORAES, A. S.; MESQUITA, C. M.; DELALIBERA, H. C.; POSSAMAI, E. J. **Manejo Integrado da Colheita:** determinação das perdas de grãos na colheita de soja usando o Copo Medidor da Embrapa. 1. ed. Londrina: Embrapa, 2024. 40 p. (Comunicado Técnico, 112).

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

TOLEDO, A.; TABILE, R. A.; SILVA, R. P.; FURLANI, C. E. A.; MAGALHÃES, S. C.; COSTA, B. O. Characterization of losses and crop residue cover distribution in soybean mechanized harvest. **Engenharia Agrícola**, v.28, p.710-719, 2008.

UNITED NATIONS. **Data Portal Population Division**, 2025. Disponível em: <https://population.un.org/dataportal/home?df=eb498488-6f48-4e39-9264-714b16fe16af>. Acesso em 17 jun. 2025.



CAPÍTULO 56

RELAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DE MILHO EM ÁREAS IRRIGADAS NO RIO GRANDE DO SUL

Relationship of vegetation index with corn yield in irrigated fields in Rio Grande do Sul

Núbia Pentiado Aires[1]; María Silvia Pardi Lacruz[1]; Amanda Avozani[2]; Jocélia Rosa da Silva[1]; Robson Giacomeli[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Avenida Roraima, 1000, Bairro Camobi, CEP 97105-900, Santa Maria – RS, Brasil, Programa de Pós-graduação em Agricultura de Precisão, nubia.aires@gmail.com.
[1]UFSM, Professora do Departamento de Ensino do Colégio Politécnico, spardilacruz@gmail.com.
[2]Texas Tech University, 2500 Broadway W, 79409, Lubbock - TX, United States, Programa de Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental amanda.avozani@ttu.edu.
[1]UFSM, Departamento de Fitotecnia, joceliarosa.s@gmail.com.
[1]UFSM, Departamento de Fitotecnia, robsongiacomeli@yahoo.com.br.

RESUMO

A oferta de alimentos para abastecer a população mundial é um tema amplamente discutido, com a necessidade de aumentar a produtividade sem expandir a área cultivada, priorizando a sustentabilidade dos recursos hídricos, energéticos e ambientais. Este estudo teve como objetivo identificar qual índice espectral de vegetação, obtido a partir de imagens do sensor *multiespectral Imager* – MSI do Sentinel-2AB apresenta melhor correlação com a produtividade do milho, em diferentes estádios fenológicos sob condições irrigadas no Rio Grande do Sul. O trabalho foi realizado em cinco áreas localizadas nos municípios de Catuípe e Cachoeira do Sul, nas safras de 2019/20 e 2020/21. Foram calculados os índices NDVI, SAVI, ARVI e EVI2. Os resultados indicaram correlação de Pearson muito alta. Para os estádios V6 a V10, o ARVI e o NDVI apresentaram melhor desempenho na estimativa da produtividade apresentando coeficiente de determinação, respectivamente, R^2 0,73 e R^2 0,70. No estádio R1/R2 destacaram-se o SAVI com R^2 0,67 e o ARVI com R^2 0,62 e no R4, o NDVI com R^2 0,50. Já no estádio R5, a correlação com a produtividade foi baixa devido ao início da senescência da cultura.

Palavras-chave: Índices de vegetação. Sensoriamento Remoto. Estimativa.

ABSTRACT

The global demand for food requires increased agricultural productivity without expanding cultivated areas, while ensuring the sustainability of water, energy, and environmental resources. This study aimed to identify which spectral vegetation index, obtained images from the Sentinel-2AB *Multispectral Imager* - MSI sensor, best correlates with corn yield at different phenological stages under irrigated conditions in Rio Grande do Sul. The research was conducted in five irrigated fields located in the municipalities of Catuípe and Cachoeira do Sul, during the 2019/20 and 2020/21 crop seasons. The vegetation indices NDVI, SAVI, ARVI, and EVI2 were calculated. The results indicated a very high Pearson correlation. For stages V6 to V10, ARVI and NDVI showed the strongest correlation with corn yield, respectively with values $R^2$0.73 and $R^2$0.70. In stage R1/R2, SAVI with $R^2$0.67 and ARVI with $R^2$0.62 and in R4, the NDVI with $R^2$0.50. For stage R5, the correlation was very low due to the onset of crop senescence.

Keywords: Vegetation indices. Remote Sensing. Estimation.

ISBN 978-65-990392-6-3

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial e a necessidade de garantir segurança alimentar impõem desafios crescentes à agricultura moderna. Para atender à demanda por alimentos, é essencial aumentar a produtividade sem expandir a área cultivada, priorizando a sustentabilidade dos recursos hídricos, energéticos e ambientais (ANA, 2019).

Nesse contexto, práticas como a irrigação e a agricultura de precisão têm se destacado por possibilitarem um uso mais eficiente de insumos, promovendo o aumento da produtividade sem comprometer os recursos naturais. Dentre as ferramentas empregadas na agricultura de precisão, o sensoriamento remoto tem sido amplamente utilizado para obter informações sobre a lavoura, sem a necessidade de contato direto, permitindo a visualização e identificação de diferentes características da cobertura vegetal e do solo (SHIRATSUCHI et al., 2014).

Segundo esses autores, o sensoriamento remoto pode ser aplicado em diversas frentes, como avaliação nutricional das plantas, monitoramento hídrico, detecção de doenças e pragas, previsão do tempo e, especialmente, na estimativa de produtividade. De acordo com Villalba (2012), os índices de vegetação são ferramentas úteis para estimar o potencial produtivo dos cultivos, além de auxiliar na identificação de fatores limitantes e estratégias de manejo. Para Formaggio e Sanches (2017), esses índices permitem estimar a cobertura vegetal e a atividade fotossintética da cultura.

Entre os principais índices espectrais utilizados destacam-se NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*) e EVI2 (*Enhanced Vegetation Index 2*), que permitem avaliar o vigor vegetativo da planta ao longo do ciclo. Entretanto, o desempenho desses índices pode variar de acordo com o estádio fenológico da cultura e as condições ambientais, sendo necessário entender em quais momentos eles são mais eficazes na correlação com a produtividade.

Com o avanço dos sensores orbitais, como o MSI (*Multispectral Instrument*) da plataforma Sentinel-2AB, tornou-se possível obter imagens com alta resolução espacial e temporal, permitindo análises mais eficientes da dinâmica da vegetação ao longo do ciclo produtivo. Essa abordagem é especialmente relevante em áreas irrigadas, onde a cultura apresenta maior regularidade de desenvolvimento.

Diante disso, o objetivo desta pesquisa foi identificar o desempenho dos índices de vegetação NDVI, SAVI, ARVI e EVI2, e determinar qual apresenta melhor correlação com a produtividade do milho em diferentes estádios fenológicos, sob condições irrigadas no Rio Grande do Sul, utilizando imagens do satélite Sentinel-2.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

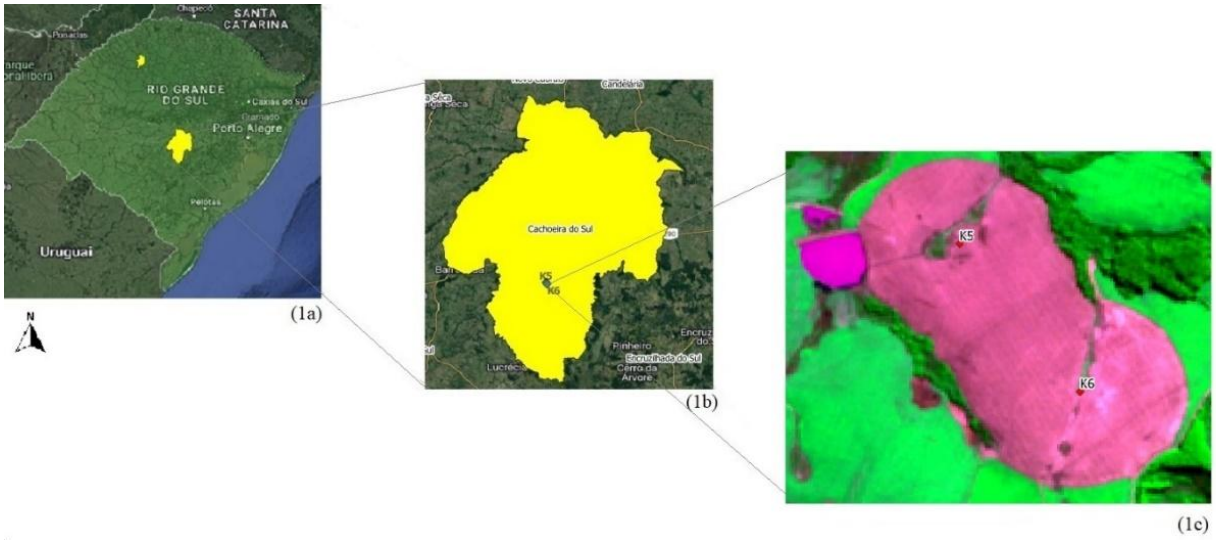
2.1 Áreas de estudo

Foram selecionadas cinco áreas de cultivo de milho *(Zea mays L.)* irrigadas por pivô central nas safras 2019/2020 e 2020/2021. Dentre essas áreas, três estavam localizadas no município de Catuípe, na região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, e duas no município de Cachoeira do Sul, na região Centro-Sul (Figuras 1 e 2).

As áreas estudadas contam com monitoramento de irrigação realizado pela empresa Irriga Global, com base em dados de solo, clima, cultura e equipamentos. A empresa fornece ao produtor recomendações sobre o momento e a quantidade adequada de irrigação, promovendo o uso eficiente da água e o bom desenvolvimento da cultura.

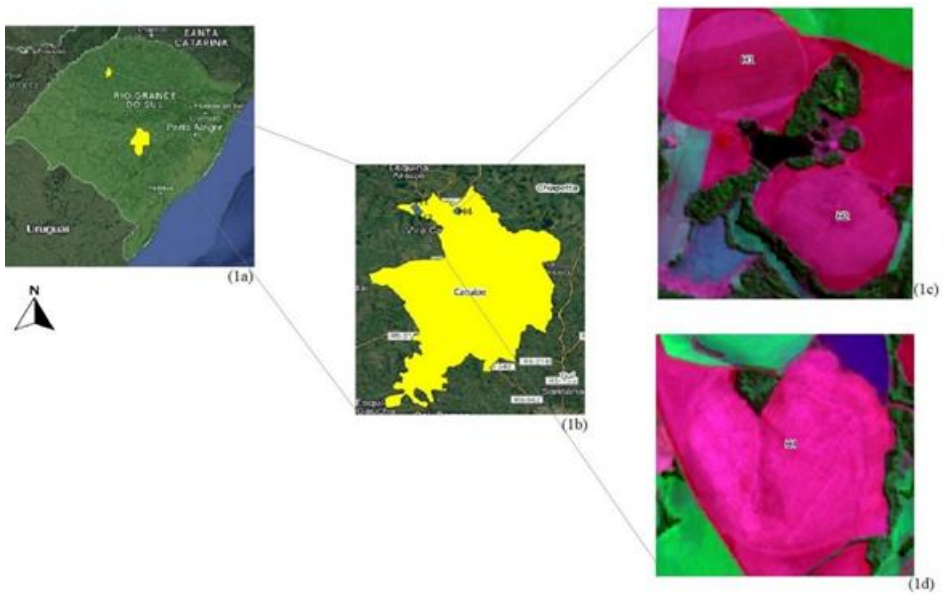
ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 1 - Localização das áreas do estudo, situadas nos municípios de Cachoeira do Sul, no Estado do Rio Grande do Sul.



Nota - 1a localização do município onde foram realizados os estudos; 1b localização dos pivôs estudados na região centro-sul, município de Cachoeira do Sul; 1c localização e formato das áreas estudadas, pivôs K5 e K6.
Fonte: Autores (2025).

Figura 2 - Localização das áreas do estudo, situadas nos municípios de Catuípe, no Estado do Rio Grande do Sul.



Nota - 1a localização do município onde foram realizados os estudos; 1b localização dos pivôs estudados na região noroeste, município de Catuípe; 1c localização e formato da área estudada, pivô H4; 1d localização e formato da área estudada, pivô H1 e H2.
Fonte: Autores (2025).

O clima das regiões é classificado como subtropical úmido, tipo Cfa na classificação climática de Köppen (MORENO, 1961; ALVARES et al., 2014), com temperaturas médias entre 15 °C e 18 °C, mínimas de até –10 °C e máximas de 40 °C. A precipitação média anual varia de 1.299 a 1.500 mm no sul do estado e de 1.500 a 1.800 mm no Norte (WREGE et al., 2012).

ISBN 978-65-990392-6-3

Foram utilizados todos os pixels da grade de pontos das cinco áreas para analisar a estimativa de produtividade com base em índices espectrais de vegetação. Diferentes híbridos de milho foram semeados em sistemas de pivô central nas duas safras avaliadas. Os dados físico-hídricos do solo e os dados fenológicos da cultura (RITCHIE et al., 1993) foram obtidos junto ao banco de dados da empresa. As áreas H1, H2 e H4 apresentam solo argiloso, com 31, 29 e 70 hectares, respectivamente. Já as áreas K5 e K6 possuem solo franco-arenoso, com 36 e 48 hectares, respectivamente. Os dados climáticos diários foram obtidos de estações meteorológicas próximas a cada região.

2.2 Processamento de dados

As imagens de satélite foram obtidas no período de 17/08/2019 a 09/01/2020 e entre 30/07/2020 e 14/01/2021, através do site do *Copernicus Europe's Eyes on Earth* (https://www.copernicus.eu/en). Para processamento digital foi utilizado o software QGIS versão 3.10.14 e para tabulação dos dados levantados foi utilizado o Microsoft Office Excel 2016.

2.3 Determinação dos índices espectrais de vegetação

Foram analisados quatro índices de vegetação para verificar quais deles apresentavam melhor correlação com a produtividade do milho.

O NDVI foi calculado conforme a através Equação 1:

$$NDVI = \frac{\rho nir - \rho red}{\rho nir + \rho red}; \qquad NDVI = \frac{B8-B4}{B8+B4} \tag{2}$$

Onde a banda B8 corresponde à região do infravermelho próximo e a banda B4 corresponde à região do vermelho no sensor MSI/Sentinel-2.

O SAVI foi calculado com a equação abaixo (Equação 2):

$$SAVI = \frac{[(\rho nir - \rho red)(1+L)]}{[(\rho nir + \rho red) + L]}; \qquad SAVI = \frac{[(B8-B4)(1+L)]}{B8+B4+L}; \qquad SAVI = \frac{[(1+0{,}5)(B8-B4)]}{B8+B4+0{,}5} \tag{3}$$

Onde B8 corresponde a banda do infravermelho próximo e B4 é a banda do vermelho. O parâmetro L é um fator de ajuste utilizado para minimizar o efeito do solo, sendo dependente da cobertura vegetal, com valores variando de 0 a 1. De acordo com Huete (1988) recomenda-se utilizar L= 0,25 para altas densidades de vegetação, L=0,5 para médias densidades e L=1 para baixas densidades. No presente trabalho utilizou-se L=0,5 por ser o valor mais utilizado, conforme Formaggio e Sanches (2017). Além disso, valores de L próximo a 0 tendem a se aproximar aos do NDVI, enquanto o L no valor 0,5, é considerado representativo para o dossel do milho ao longo de seu desenvolvimento.

Kaufman e Tanré (1992) propuseram um índice que minimiza os efeitos atmosféricos, o ARVI, Equação 3:

$$ARVI = \frac{(\rho nir - (\rho red - \gamma(\rho red - \rho blue))}{(\rho nir + (\rho red - \gamma(\rho red - \rho blue))}; \quad ARVI = \frac{(B8 - (B4 - 1(B4 - B2))}{(B8 + (B4 - 1(B4 - B2))} \tag{3}$$

Onde γ é o coeficiente gama e assume valor igual a 1, B8 é a banda do infravermelho próximo, B4 é a banda do vermelho e B2 é a banda do azul.

E o EVI2 consegue destacar um pouco melhor as diferenças de sazonalidade dentro da lavoura, o que o torna mais eficiente do que o EVI. Também apresenta a vantagem da não utilização da banda azul, que apresenta problemas decorrentes dos efeitos atmosféricos. Autores como Paula et al. (2013) realizaram comparações entre o EVI e o EVI2 destacando a vantagem de utilizar o EVI2 ao invés do EVI em avaliações de pastagens.

O EVI2 pode variar de -1 a 1 e é calculado conforme a equação abaixo (equação 4):

$$EVI2 = 2{,}5\left[\frac{(\rho nir - \rho red)}{(\rho nir + 2{,}4\rho red + 1)}\right]; \qquad EVI2 = 2{,}5\left[\frac{(B8-B4)}{(B8+2{,}4*B4+1)}\right] \tag{4}$$

Onde B8 é a banda do infravermelho próximo e B4 é a banda do vermelho.

2.4 Estimativa de produtividade

As imagens dos índices espectrais de vegetação foram recortadas conforme os limites vetoriais de cada pivô central, a partir dos quais foram obtidos os valores máximo, médio, mínimo e a soma dos pixels correspondentes a cada área. Esses dados foram utilizados para estimar a produtividade, considerando a variabilidade interna das lavouras e a correspondência com os dados reais (Tabela 1).

Para fins de análise, as imagens foram agrupadas em quatro diferentes períodos fenológicos da cultura: o primeiro grupo corresponde aos estádios vegetativos V6 a V10; o segundo grupo abrange os estádios reprodutivos iniciais R1 e R2; o terceiro corresponde ao estádio R4; e o quarto ao estádio R5. Essa divisão foi feita com base na dinâmica fisiológica da cultura do milho e na relevância de cada fase para a formação do rendimento.

A seguir, foi realizada uma análise de componentes principais (PCA) com o objetivo de agrupar os índices e a produtividade real com base em suas características de variabilidade. Após o teste de normalidade, aplicou-se a correlação de Pearson para verificar quais índices espectrais apresentavam relação estatisticamente significativa com a produtividade. Os valores dos coeficientes de correlação encontrados foram classificados seguindo-se a classificação proposta por Hopkins (2000). Para os índices que demonstraram forte correlação, foram conduzidas análises de regressão linear simples, a fim de quantificar a capacidade preditiva em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura.

Embora as imagens tenham sido adquiridas desde a emergência da cultura até a maturação fisiológica, priorizou-se, na estimativa de produtividade, o uso de imagens obtidas durante o período vegetativo (quando as plantas apresentavam de nove a doze folhas) e no início do período reprodutivo (estádios R2 a R3). Segundo Johnson (2014), Sakamoto et al. (2014) e Peralta et al. (2016), o período crítico para definição da produtividade do milho ocorre aproximadamente 20 dias antes e 20 dias após o florescimento, sendo este intervalo o mais adequado para correlacionar os índices espectrais ao rendimento da cultura.

Tabela 1 – Dados de produtividade das áreas

Pivô	Semeadura	Colheita	Híbridos	Área (ha)	Produtividade (T ha^{-1})
H1	28/08/2019	08/01/2020	P1630	31	13,27
H1	29/08/2020	14/01/2021	P1225	31	11,52
H2	29/08/2019	08/01/2020	P1630	29	13,06
H2	29/08/2020	14/01/2021	P1225	29	11,94
H4	22/08/2019	04/01/2020	P1630	70	12,72
H4	25/08/2020	14/01/2021	AG 9025	70	14,10
K5	20/08/2019	09/01/2020	Dkb230	36	9,48
K5	31/07/2020	03/01/2021	AG9025	36	13,62
K6	17/08/2019	09/01/2020	Dkb230	48	10,08
K6	30/07/2020	03/01/2021	AG9025	48	13,26

Fonte: Autores (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram avaliados os estádios fenológicos divididos em quatro grupos: o primeiro grupo de V6 a V10; o segundo grupo R1 e R2; o terceiro compreende o estádio R4; e o quarto ao estádio R5. Segundo Boschiero (2024) o ciclo de vida da planta de milho é dividido em duas principais fases de desenvolvimento: o reprodutivo e o vegetativo que ajudam a compreender o ciclo da planta. Portanto essa divisão foi realizada com base na dinâmica fisiológica da cultura do milho e na relevância de cada fase para a formação do rendimento.

O PCA para os estádios vegetativos V6 a V10 revelou correlação muito alta entre os valores máximos e médios dos índices NDVI, SAVI, ARVI e EVI2, indicando que todos apresentaram potencial para serem utilizados na estimativa da produtividade do milho nesse período. Em contrapartida, os valores somados desses índices apresentaram tendência inversa à produtividade, diminuindo à medida que o rendimento aumentava, o que inviabiliza seu uso direto na estimativa produtiva.

Nos estádios reprodutivos iniciais R1 e R2, observou-se comportamento semelhante ao dos estádios vegetativos, com os valores médios e máximos mantendo correlação positiva e significativa com a produtividade. Isso reforça o potencial de uso desses índices espectrais nas fases anteriores e iniciais da formação de grãos, período considerado crítico para o rendimento da cultura, conforme destacado por Johnson (2014), Sakamoto et al. (2014) e Peralta et al. (2016).

No entanto, a análise para o estádio R4 indicou um padrão distinto, com menor correlação entre os índices espectrais e a produtividade. A distribuição dos dados neste estádio revelou maior dispersão e baixa associação estatística com os valores reais de rendimento, sugerindo que, a partir dessa fase, os índices espectrais perdem capacidade preditiva. Esse comportamento pode estar associado ao acúmulo de biomassa e à senescência foliar, que interferem na resposta espectral, como também discutido por Sakamoto et al. (2010).

A regressão linear foi aplicada apenas aos índices espectrais que, em cada estádio fenológico, apresentaram correlação estatisticamente significativa com a produtividade. Os resultados revelaram coeficientes de determinação (R^2) mais elevados nos estádios V6 a V10 e R1/R2, especialmente para os valores máximos e médios dos índices NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 (Figura 3 e Figura 4).

De maneira semelhante, a análise de componentes principais para o estádio R5 indicou que a produtividade apresentou alta correlação apenas com a soma dos valores do NDVI e do ARVI, enquanto o SAVI e o EVI2 se correlacionaram entre si, mas sem relação significativa com a produtividade. Esse estádio mantém a tendência observada no R4, porém com características fisiológicas mais acentuadas: as folhas estão senescendo e os grãos se aproximam da maturação final, alterando a resposta espectral da cultura.

Plantas fotossinteticamente ativas absorvem energia eletromagnética principalmente nas regiões do azul e do vermelho e refletem nas regiões do verde e sobretudo do infravermelho próximo (NIR). À medida que a cultura atinge a maturação fisiológica e inicia a senescência, a reflexão se desloca para as regiões do vermelho e do infravermelho médio (SWIR), refletindo as alterações fisiológicas e estruturais do dossel.

Na análise de correlação de Pearson para os estádios V6 a V10, os valores máximo, médio e soma dos índices apresentaram correlação significativa com a produtividade. Os índices que mostraram as correlações positivas muito alta foram o ARVI máximo e médio, com valores de 0,86 e 0,85, respectivamente, seguidos pelo NDVI máximo e médio, com 0,84 e 0,83, essa melhor desenvoltura do ARVI pode ter ocorrido devido ele ser menos sensível aos efeitos da atmosfera se comparado ao NDVI, conforme Ji et al. (2025) as aplicações eficazes de dados de NDVI são prejudicadas pelo ruído dos dados devido a fatores como presença de

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque/RS · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

nuvens. Na sequência, destacam-se o SAVI e o EVI2 máximos (0,80 e 0,79), SAVI e EVI2 médios (0,78 e 0,76), NDVI e ARVI somados (0,73 e 0,72) e, por fim, SAVI e EVI2 somados, ambos com 0,70. Entre os estádios V6 e V10, a planta de milho define seu potencial produtivo, especialmente o número de fileiras de grãos na espiga, o que pode justificar a correlação muito alta observada com os índices. Nesses estádios iniciais o bom desempenho do SAVI pode ser explicado pela menor cobertura vegetal, conforme explanado por Neves et al. (2025).

Comparando o NDVI e o EVI2, os resultados obtidos diferem dos encontrados por Bolton e Friedl (2013), que apontam o EVI2 como mais eficiente para estimar a produtividade do milho. No entanto, para a soja, os autores não observaram diferenças significativas entre os dois índices.

Na análise de Pearson para os estádios R1/R2, o SAVI máximo apresentou correlação muito alta com a produtividade (0,82), seguido pelo ARVI máximo (0,79). Ambos são índices aprimorados, com correções para solo e atmosfera, respectivamente. Em seguida, o NDVI e o EVI2 máximos apresentaram correlações, com valores de 0,73 e 0,71. Os valores máximos apresentaram melhor desempenho nesses estádios porque a cultura está no auge do vigor vegetativo. Nessa fase, o NDVI tende a saturar, ou seja, atinge valores próximos a 1, o que limita sua capacidade de detectar diferenças no desenvolvimento da cultura. O aumento da área foliar eleva a reflectância na região do NIR, aumentando os valores do NDVI até o ponto de saturação (OLIVEIRA, 2017; ZANZARINI et al., 2013).

No estádio R4, a correlação de Pearson demonstrou que os valores médios dos índices NDVI, SAVI e EVI2 apresentaram correlação significativa com a produtividade. O NDVI apresenta uma alta correlação linear com a atividade fotossintética das plantas (Schaparini et al., 2020; Trindade et al., 2021) com isso é amplamente utilizado para esse tipo de análise por ser de fácil aplicação, mas sofre com a saturação em estágios de alto vigor. O SAVI apresenta correção para o solo, tornando-o mais confiável em áreas com menor cobertura vegetal. Já o EVI2 minimiza os efeitos do solo e da atmosfera, sendo sensível a variações na estrutura do dossel (JIANG et al., 2008). Os demais índices apresentaram correlação fraca, possivelmente devido ao fato de que, nesse estádio, a cultura está direcionando sua atividade fisiológica para o enchimento dos grãos, com redução do vigor vegetativo.

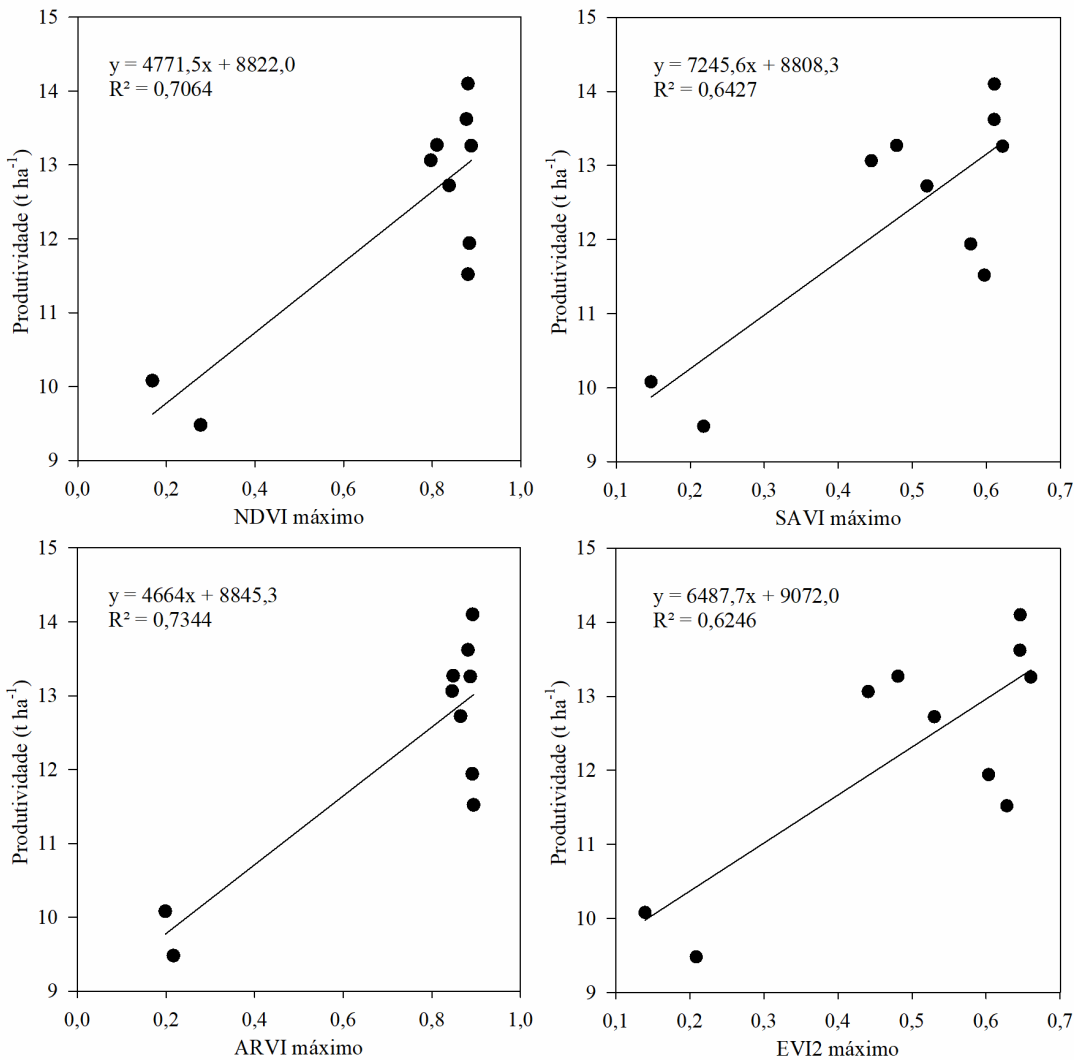
A literatura destaca que o período ideal para estimativa da produtividade com imagens de satélite situa-se entre os estádios V8 e V14 e entre R2 e R3, variando conforme o híbrido. Autores como Johnson e Mueller (2010), Peralta et al. (2016) e Sakamoto et al. (2014) afirmam que o período crítico para definição do rendimento do milho ocorre cerca de 20 dias antes e 20 dias após a floração.

No estádio R5, nenhum índice espectral apresentou correlação significativa com a produtividade. Nessa fase, os grãos encontram-se em estágio avançado de maturação, com alto acúmulo de amido, e a planta apresenta senescência acentuada. A maioria da radiação eletromagnética nas faixas do visível e do NIR é absorvida, resultando em baixa reflectância, o que compromete a performance dos índices baseados em vigor vegetativo.

A regressão linear da produtividade com os índices espectrais foi aplicada apenas para os estádios em que houve correlação significativa. A Figura 3 apresenta os resultados para os valores máximos nos estádios V6 a V10. Os maiores coeficientes de determinação foram observados para o ARVI (0,73) e o NDVI (0,70), seguidos por SAVI (0,64) e EVI2 (0,62). Os valores máximos demonstraram maior significância por estarem mais diretamente relacionados ao vigor das plantas, que ainda se encontram em fase de expansão foliar, sem cobertura total do solo, tornando os picos espectrais mais sensíveis à produtividade.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 12 - Regressão linear da relação da produtividade com os índices de vegetação máximo do NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 para áreas em estádios de V6 a V10.

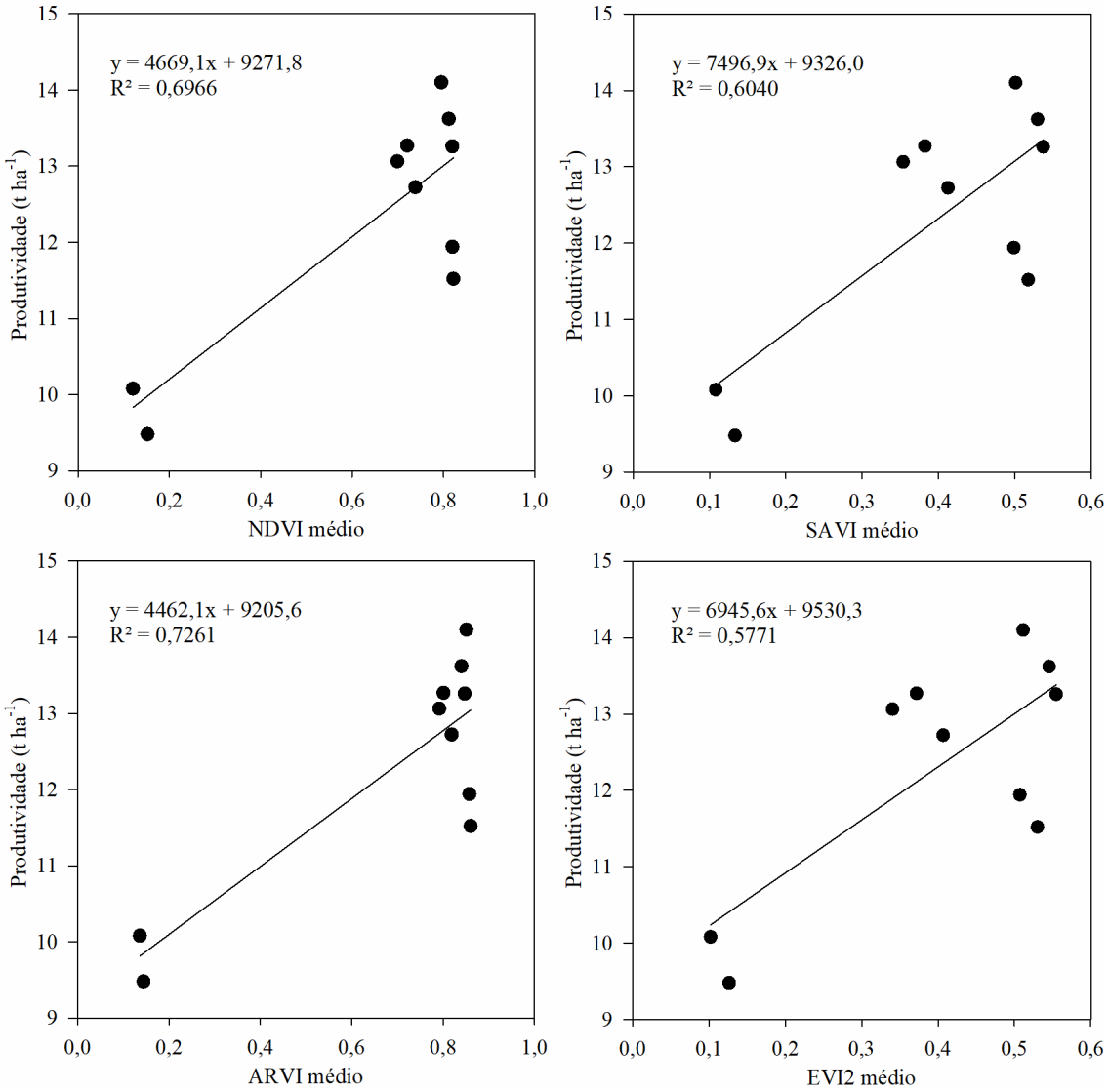


Fonte: Autores (2025).

A Figura 4 apresenta os resultados da regressão linear para os valores médios dos mesmos índices. O desempenho foi semelhante: ARVI (R^2 = 0,73), NDVI (0,70), SAVI (0,60) e EVI2 (0,58). Durante a safra 2019/20, no mês de outubro, foram registrados volumes elevados de precipitação, o que pode ter contribuído para a presença de nuvens nas imagens, uma das limitações dos dados de sensoriamento remoto óptico.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 4 - Regressão linear da relação da produtividade com os índices de vegetação médio do NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 para áreas em estádios de V6 a V10.



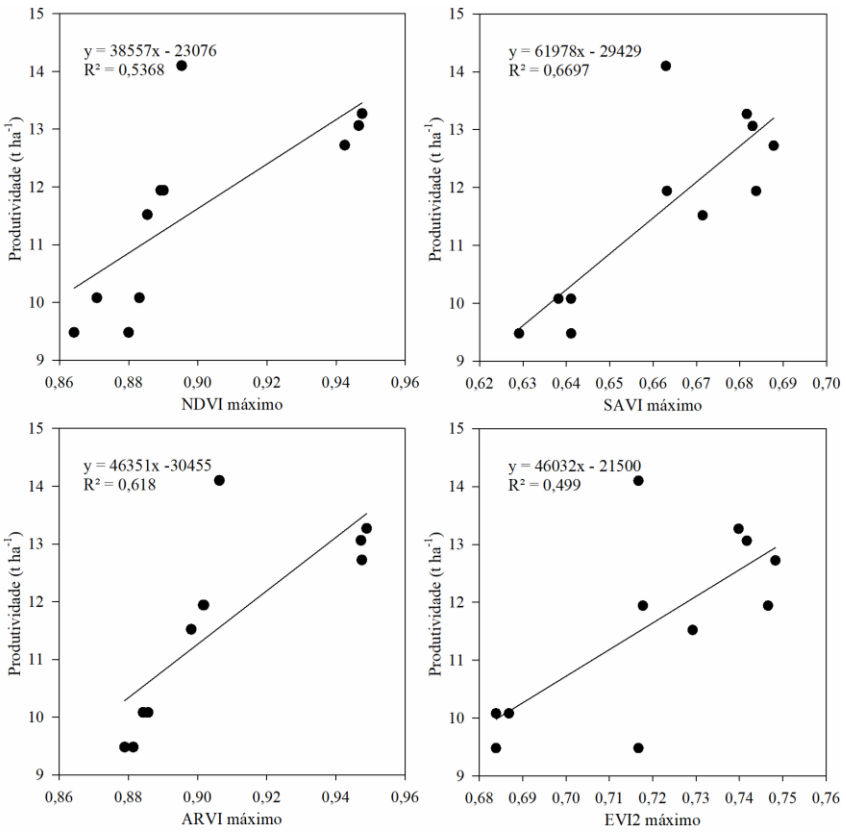
Fonte: Autores (2025).

Nos estádios R1/R2 (Figura 5), os melhores coeficientes de determinação foram obtidos com o SAVI máximo (0,67) e ARVI máximo (0,62), seguidos por NDVI máximo (0,54) e EVI2 máximo (0,50). O uso do SAVI é justificado pela presença de espaços descobertos no solo, decorrentes do espaçamento de 0,45 m entre linhas. O desempenho do ARVI pode ser atribuído às condições atmosféricas observadas na safra 2020/21, com alta nebulosidade durante o período.

Para o estádio R4 (Figura 6), os coeficientes de determinação foram NDVI médio (0,50), EVI2 médio (0,40) e SAVI médio (0,37), demonstrando menor capacidade de predição da produtividade. A cultura, neste ponto, encontra-se aproximadamente 28 dias após a floração, priorizando o enchimento de grãos. Esses resultados corroboram os estudos de Johnson (2014), Sakamoto et al. (2014) e Peralta et al. (2016).

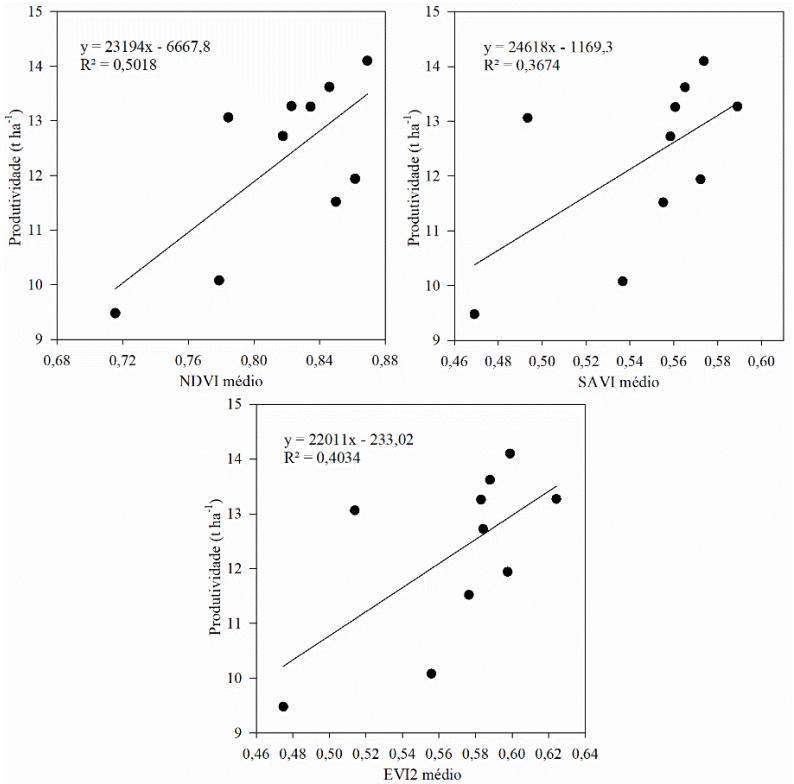
ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 13 - Regressão linear da relação da produtividade com os índices de vegetação máximo do NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 para áreas em estádios de R1/R2.



Fonte: Autores (2025).

Figura 6 - Regressão linear da relação da produtividade com o NDVI médio para áreas em fenologia R4.



Fonte: Autores (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

A Tabela 2 resume os índices que apresentaram significância estatística com a produtividade nos diferentes estádios fenológicos. Os estádios V6 a V10 e R1/R2 concentraram a maioria das relações significativas, enquanto, em R4, apenas NDVI, SAVI e EVI2 mantiveram essa característica.

Tabela 2 - Índices de Vegetação e a relação significativa com a produtividade.

Estádios	NDVI				SAVI				ARVI				EVI2			
	Máx	Méd	Mini	Soma	Máx	Méd	Mini	Soma	Máx	Méd	Mini	Soma	Máx	Méd	Mini	Soma
V6 a V10	0,84	0,83		0,73	0,80	0,78		0,70	0,86	0,85		0,70	0,79	0,76		0,70
R1/R2	0,73	0,54			0,82	0,60			0,79	0,68			0,71	0,59		
R4		0,71				0,61								0,64		
R5																

Nota: As marcações em cinza indicam os índices de vegetação e os respectivos estádios da cultura que apresentaram significância com a produtividade.
Fonte: Autores (2025).

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que os índices espectrais de vegetação NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 apresentam alta correlação com a produtividade do milho sob irrigação por pivô central. Os maiores valores de correlação foram observados no estádio vegetativo, entre V6 e V10, que é quando a planta de milho define o seu potencial produtivo.

A análise de componentes principais possibilitou identificar os estádios mais representativos para o uso dos índices, sendo que o NDVI e o ARVI apresentaram desempenho ligeiramente superior ao EVI2 e SAVI em determinados momentos. Essa informação pode ser utilizada para a tomada de decisão em tempo real no manejo agrícola, otimizando o uso de recursos hídricos e insumos.

Além disso, o uso de imagens de sensoriamento remoto aliado à análise estatística mostrou-se uma ferramenta eficaz para a previsão da produtividade agrícola, contribuindo para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis e assertivas.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. L. M., SPAROVEK, G. KÖPPEN'S climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil**. 2ª Ed. - Brasília - DF, 2019.

BOLTON, K. D.; FRIEDL, A. M. **Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation índices and crop phenology metrics**. In Agricultural and Forest Meteorology, volume 173, 15 May 2012, Pages 7487.

ISBN 978-65-990392-6-3

BOSCHIERO, B. N. **Fenologia do milho: manejo aplicado nos principais estádios de desenvolvimento**. Disponível em: https://agroadvance.com.br/blog-fenologiadomilho/#:~:text=Os%20est%C3%A1dios%20vegetativos%20do%20milho,est%C3%A1dio%20de%20pendoamento%20(VT). Acesso 08 de setembro de 2025.

FORMAGGIO, A. R; SANCHES, I. D. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo, oficina de textos, 2017.

HOPKINS, W. G. **Correlation coeficiente**: a new view of statistics. 2000. Disponível em: <http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>. Acesso em: 12 dez. 2021.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, n. 25, p. 295-309, 1988.

JIANG, Z; HUETE, A. F; DIDAN, K; MIURA, T. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3833-3845, 2008.

JI, S; HAN, S; HU, J; LI, Y; HAN, J. C. **RETRACTED: Temporal-Difference Graph-Based Optimization for High-Quality Reconstruction of MODIS NDVI Data. *Remote Sensing*, *17*, 349, 2025.**

JOHNSON, D. M. An assessment of pre- and within-season remotely sensed variables for forecasting corn and soybean yields in the United States. **Remote Sensing of Environment**, v. 141, p. 116-128, 2014.

JOHNSON, D. M.; MUELLER, R. The 2009 cropland data layer. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 76, p. 1201-1205, 2010.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, p. 261-270, 1992.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul. Secretaria da agricultura**, Porto Alegre, p. 42, 1961.

NEVES, S. A.; SILVA, P. A.; OLIVEIRA, G. S.; SOUZA, J. P. S.; CARDOZO, E. P**. Correlação entre a produtividade do milho e os índices de vegetação utilizando imagens do sentinel-2.** Revista de gestão e secretariado – GeSec, V.16, N. 4, P. 01-19. São José dos Pinhais, Paraná, Brasil, 2025.

OLIVEIRA, M. F. **Modelo de predição de produtividade da cultura do milho por meio de NDVI em arranjos espaciais. Dissertação de mestrado** – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, p. 44, 2017.

PAULA, S. C.; VEDOVATO, L. B.; SILVA, G. B. S.; VICENTE, L. E. **Comparação entre os índices espectrais EVI e EVI 2 para discriminação de pastagens plantadas e naturais**. VII Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica – CIIC. Campinas, São Paulo, p. 8, 2013.

ISBN 978-65-990392-6-3

PERALTA, N.; ASSEFA, Y.; DU, J.; BARDEN, C. J.; CIAMPITTI, I. A. Mid-season high-resolution satellite imagery for forecasting site-specific corn yield. **Remote Sensing**, v. 8, n. 10, p. 1-16, 2016.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. **How a corn plant develops**. Iowa: Special Bulletin, n. 48. 1993.

SAKAMOTO, T; GITELSON, A. A; ARKEBAUER, R., T. J. Near real-time prediction of U.S. corn yields based on time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 147, p. 219-231, 2014.

SCHAPARINI, L. P.; FONTANA, D. C.; DALMAGO, G. A.; RODIGHERI, G.; FERNANDES, J. M. C.; SANTI, A.; VARGAS, P. R. **Análise comparativa entre índices de vegetação e sua relação com o balanço hídrico em soja.** Agrometeoros, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 183-190, 2020. http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v27i1.26574.

SHIRATSUCHI L. S.; BRANDÃO Z. N.; VICENTE L. E.; VICTORIA, D. C.; DUCATI, J. R.; OLIVEIRA, R. P.; VILELA, M. F. **Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão**. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília: EMBRAPA, 2014, c. 4, p. 58-73, 2014.

TRINDADE, J. P. P.; VOLK, L. B. S.; ROCHA, D. S. **Aplicação do Índice Normalizado de Vegetação no Monitoramento de Sistema de Unidades de Manejo.** Embrapa Pecuária Sul, Bagé, v. 1, n. 1, p. 1-31, 2021.

VILLALBA E. O. H. **Nutritional status of corn evaluated by optical spectroscopy in Paraguay**. Tese de doutorado - Universidade Federal de Santa Maria, p. 132, 2012.

WREGE, M, S; STEINMETZ, S; JÚNIO, C, R; ALMEIDA, I, R. **Atlas Climático da Região Sul do Brasil**. 2ª edição, Embrapa, Brasília, DF, 2012.

ZANZARINI, F. V.; PISSARRA, T. C. T.; BRANDÃO, F. J. C.; TEIXEIRA, D. B. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat / ETM + com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 608–614, 2013.

CAPÍTULO 57

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA NA ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO MPRI COM DRONE MAVIC 3M

Comparison of Radiometric Calibration Methods for Estimating the MPRI Vegetation Index Using the DJI Mavic 3M Drone

Frederico Ravazi de Castro [1]; João Batista da Silva Santos [2]; Luise Jardim Pedó [3]; Lúcio de Paula Amaral [4]; Victor Hugo Lezcano Velazco [5]; Wagner Nart Macedo [6]; Gerson dos Santos Lisboa[7]; Emanuel Araújo Silva[8]

[1,2,3,5 e 6] UFSM, Mestrandos em Agricultura de Precisão, Av. Roraima, 1000 - Camobi, Santa Maria - RS, 97105-000, fredravazi@hotmail.com; joao-santos.2@acad.ufsm.com.br; luisepedo@yahoo.com.br; lucio.amaral@ufsm.br; vlezcano01@gmail.com; wagner.nart@hotmail.com

[7]Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Bairro Fazenda Santo Antônio, CEP: 74971-451 - Aparecida de Goiânia - Goiás – Brasil. Pós-Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Área: Manejo Florestal) da Unicentro, Setor de Ciências Agrárias e Ambientais, Campus Cedeteg, Guarapuava, PR; gersonlisboa@ufg.br

[4] UFSM, Prof. Dr., Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão – PPGAP, Colégio Politécnico da UFSM, Prédio 70, Bloco F, Sala 211-A, Santa Maria, RS. Brasil, CEP 97.105-900, Camobi, lucio.amaral@ufsm.br;

[8]Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen, Departamento de Engenharia Florestal - Linha 7 de Setembro, s/n, BR 386 Km 40, Frederico Westphalen – RS, CEP: 98400-000; emanuel.araujo@ufsm.br

RESUMO

O uso de drones tem se destacado como uma ferramenta eficiente na agricultura de precisão, especialmente na coleta de imagens multiespectrais para o cálculo de Índices de Vegetação. Este trabalho teve como objetivo comparar diferentes métodos de calibração radiométrica de imagens coletadas com o drone DJI Mavic 3M no cálculo do *Modified Photochemical Reflectance Index* (MPRI), na cultura do trigo. Foram testados quatro cenários: (A) sem calibração, (B) com o sensor solar embarcado, (C) com a placa de calibração radiométrica *MicaSense* e (D) com a combinação de ambos. Os métodos B e C apresentaram alta correlação (r=0,99), indicando a eficiência de ambos. A ausência de calibração resultou na subestimação dos valores médios de MPRI e em menor correlação. O método D gerou maior variabilidade nos dados e correlação mais baixa (r=0,49), sugerindo que a combinação dos ajustes introduz variações indesejáveis. Conclui-se que o uso isolado da placa ou do sensor solar é suficiente para garantir imagens adequadas ao cálculo de índices de vegetação como o MPRI.

Palavras-chave: Calibração Radiométrica, Drone, MPRI.

ABSTRACT

The use of drones has stood out as an efficient tool in precision agriculture, especially for collecting multispectral images to calculate Vegetation Indices. This study aimed to compare different radiometric calibration methods of images captured with the DJI Mavic 3M drone for calculating the Modified Photochemical Reflectance Index (MPRI) in wheat crops. Four scenarios were tested: (A) without calibration, (B) with the onboard sunlight sensor, (C) with the MicaSense radiometric calibration panel, and (D) combining both methods. Methods B and C showed a high correlation (r=0.99), indicating the effectiveness of both. The absence of calibration resulted in underestimated average MPRI values and lower correlation. Method D produced greater variability in the data and a lower correlation (r=0,49), suggesting that combining the adjustments introduces undesired variations. It is concluded that the isolated use of either the panel or the sunlight sensor is sufficient to ensure images suitable for calculating vegetation indices such as the MPRI.

Keywords: Radiometric Calibration, Drone, MPRI.

ISBN 978-65-990392-6-3

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a utilização de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP), conhecidos popularmente como drones, tem crescido bastante para a prática da agricultura de precisão, realizando coletas de imagens e técnicas fotogramétricas para avaliar Índices de Vegetação (IV), sendo estes um recurso prático e econômico para o monitoramento de culturas (CANDIAGO et al., 2015), tornando mais fácil o monitoramento em um processo não destrutivo da vegetação (VON BUEREN et al., 2015).

No Brasil, o trigo é a principal cultura de inverno com 3,8 milhões de hectares cobrindo 80% da superfície deste período, com uma produção total de 8,1 milhões de toneladas. A região Sul, compreendendo os Estados do Paraná, Santa Catarina e o Rio Grande do Sul, é a principal produtora com 2,62 milhões de hectares e 6,98 milhões de toneladas, das quais são semeadas no estado do Rio Grande do Sul 1,34 milhões de hectares e produzidas 4,19 milhões de toneladas, conforme dados divulgados pela CONAB (2024). Apesar de não destacar como Estado produtor, Goiás possui o recorde de produtividade nacional com 9.630 $kg.ha^{-1}$ na safra 2021 em lavoura irrigada (SOBRINHO et al., 2022).

Os IV são parâmetros que podem ser analisados detalhadamente o desenvolvimento agronômico das culturas por meio de modelos matemáticos, ou algoritmos baseados no sensoriamento remoto, que avaliam e caracterizam a cobertura vegetal em uma determinada área de acordo com a capacidade de um objeto de interesse em refletir a luz (reflectância). As características e influências sob o desenvolvimento desse objeto irão alterar os padrões de absorção e reflexão de diferentes comprimentos de onda da luz (bandas espectrais), ao realizar uma manipulação aritmética destes, gerando um indicador qualitativo ou quantificativo acerca do estado do objeto de interesse, que no caso são as plantas (SENSIX, 2024).

A aplicação dos IV tem sido utilizada para estimar a cobertura vegetal em imagens multiespectrais, sendo possível determinar a quantidade e qualidade das plantas, bem como o solo exposto, identificado pela ausência de indivíduos vegetais nas áreas representada por um conjunto de *pixels* da imagem (BENIAICH et al., 2019). Mediante as operações algébricas utilizando-se as bandas espectrais de uma imagem, é possível gerar os IV, aprimorando a representação dos objetos da superfície terrestre de acordo com seus valores de reflectância (GAMEIRO et al., 2016).

Neste sentido, a utilização de drones para a captura e geração das imagens, aliadas a *softwares* para processamento desses dados, torna-se essencial para a obtenção dos Índices. Diante deste entendimento, Leite, Santos e Santos (2017) enfatizam que os IV são utilizados como ferramentas apropriadas no gerenciamento e monitoramento da vegetação, uma vez que podem detectar alterações na cobertura vegetal com agilidade e custo/benefício.

Visando avaliar e monitorar o ciclo de desenvolvimento de uma cultura, foram desenvolvidos diversos IV, que consistem em operações algébricas de valores obtidos de diversas faixas do espectro, nas regiões do visível e do infravermelho próximo principalmente, também denominados como bandas espectrais, sendo assim, possível obter informações sobre a cultura (biomassa, dossel, radiação absorvida, teor de clorofila) (SAKAMOTO et al., 2012).

Dentre os principais IV utilizados atualmente na agricultura, destacam-se: NVDI (*Normalized Difference Vegetation Index*) utilizado no monitoramento das lavouras para verificar o desenvolvimento da cultura, problemas de falta de água, danos causados por pragas, estimativa de produtividade entre outros, o NDRE (*Normalized Difference Red Edge Index*), índice utilizado para avaliar o teor de clorofila nas plantas, assim como sua captação de nitrogênio e a demanda de fertilizantes (AEGRO, 2020).

A busca por determinados IV é constante devido ao baixo custo dos sensores em relação aos sensores que captam comprimentos de onda do espectro na região do infravermelho (IR). Yang et al. (2008) em busca de um novo IV que representasse de forma

significativa a resposta espectral da vegetação na região do espectro do visível, desenvolveram o índice MPRI (*Modified Photochemical Reflectance Index*), este IV avalia a diferença normalizada da resposta espectral na região do verde e do vermelho, com o intuito de realçar a cobertura verde da vegetação. Li e Li (2014) avaliou o MPRI no rendimento do trigo no inverno e encontraram uma correlação aceitável com um índice de determinação (R^2) igual a 0,76.

Segundo Linhares, Rocha e Amaral (2013), em seu estudo concluiram que existe uma semelhança no comportamento entre as bandas verde e vermelha utilizadas no índice MPRI, com as bandas do infravermelho e vermelho utilizadas no índice NDVI, obtendo alta correlação e sendo utilizado como indicador vegetativo. Trabalhos de sensoriamento remoto voltados para a cultura do trigo evidenciam a viabilidade técnica e econômica da utilização de modelos matemáticos baseados em IV para estimativa de aplicação de diferentes doses de nitrogênio em função da variabilidade espacial das lavouras (TURRA, 2016).

A utilização de sensores acoplados a drones facilita e agiliza as operações, trazendo maior praticidade no trabalho de campo. Entre os sensores que podem e são utilizados nessas aeronaves, existem os sensores *Red*, *Green* e *Blue* (RGB), multiespectrais e hiperespetrais, sendo os multiespectrais os de maior aplicação na agricultura. A partir destes sensores se tem a possibilidade de gerar os IV que estão relacionados à diversas propriedades fisiológicas da cultura (JORGE e INAMASU, 2014). Essas informações são adquiridas a partir da detecção da radiação eletromagnética (REM) refletida, proveniente da interação com a cobertura vegetal em diferentes faixas do espectro eletromagnético.

Para analisar a variabilidade temporal dos atributos das plantas é necessário realizar o processo de calibração radiométrica das câmeras acopladas ao ARP (ALMEIDA, 2019). Esta etapa do processo, é de suma importância, uma vez que permite retirar efeitos ambientais ou efeitos do sensor, que possam alterar os dados associados à superfície ou cultura observada, gerando assim imagens com informações de reflectância da superfície, parâmetro mais apropriado para cálculos de índices de vegetação (LÓPEZ et al., 2011).

Diante do exposto, e visando a importância do índice de vegetação para monitoramento das culturas, bem como o processo de calibração radiométrica que se torna fundamental para obter dados espectrais confiáveis, este trabalho teve como objetivo comparar diferentes métodos de calibração das imagens para a obtenção do índice de vegetação MPRI (*Modified Photochemical Reflectance Index*) na cultura do trigo utilizando o drone MAVIC 3M da fabricante DJI.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido em uma área experimental de plantio de trigo,localizada geograficamente nas coordenadas -29.730397 (latitude) e -53.756213 (longitude) e pertencente ao Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria – Rio Grande do Sul (Figura 1).

A coleta dos dados foi estruturada da seguinte forma: Voo para coleta de imagens, o qual ocorreu no dia 03 de setembro de 2024, às 14h, em condições climáticas favoráveis, com céu claro e sem presença de nuvens; processamento das imagens coletadas em diferentes configurações, sendo modificados apenas os métodos de calibração das imagens.

Na coleta das imagens foi utilizada a aeronave remotamente pilotada - ARP da marca *DJI* modelo *Mavic 3M* (multiespectral) voando sobre a cultura do trigo a uma altura de 40 m, o que gerou um total de 1.195 imagens, além das imagens do Painel Calibrador de Refletância (CRP), marca MicaSense, as quais foram utilizadas em dois métodos de calibração das imagens.

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque/RS · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 1 – Localização da área experimental de plantio de trigo, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.



Fonte: Autores (2025)

O índice analisado foi o MPRI - *Modified Photochemical Reflectance Index* (Índice de Diferença Normalizada Verde-Vermelho, em português). Para a obtenção do índice, utilizou a equação MPRI = (G - R) / (G + R), onde R corresponde aos valores obtidos na região espectral do vermelho e G aos valores da região do verde.

De acordo com Ferreira et. al (2016), o MPRI, desenvolvido por Yang, Willis e Muller em 2008, é amplamente utilizado em estudos que exploram imagens na faixa espectral do visível. Reconhecido como um índice de desempenho fotossintético, esse índice é aplicável a diferentes tipos de vegetação.

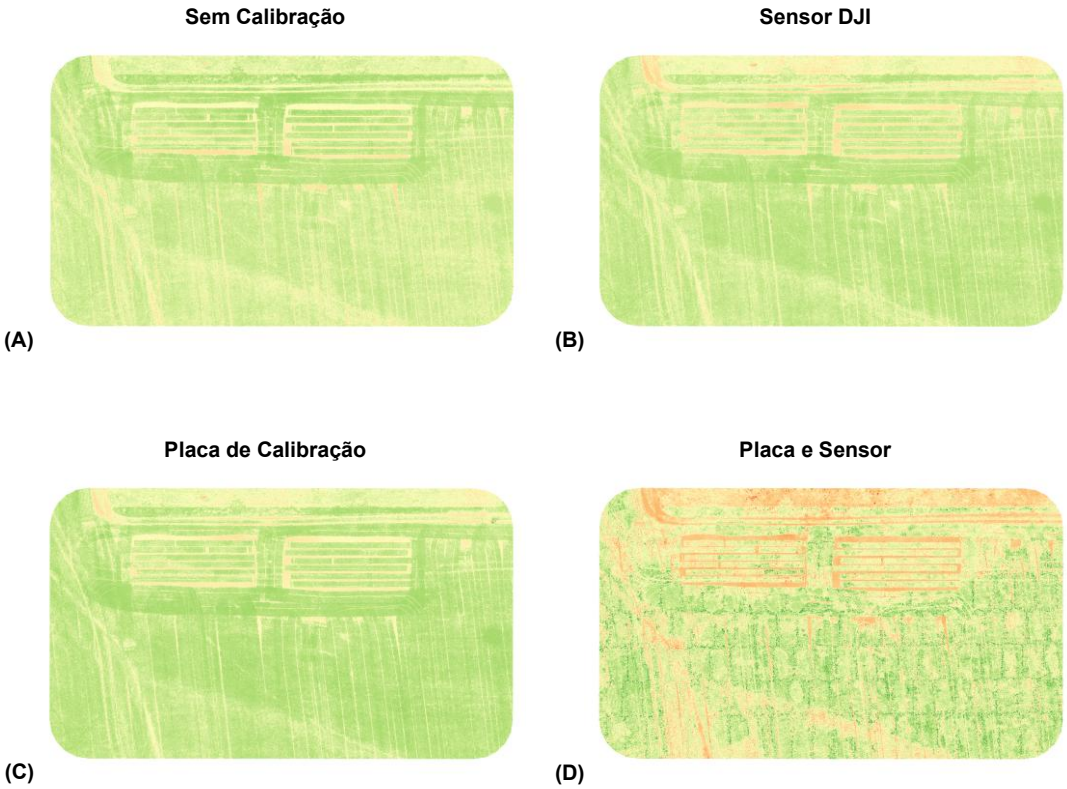
Na fase de processamento foi utilizado o *software* da Agisoft *Metashape Pro* Ver. 2.0.4, sob licença da UFSM, onde foram executados quatro processamentos distintos, todos com os mesmos parâmetros, mudando apenas a forma de calibração das imagens.

O primeiro processamento foi executado Sem Calibração (A) radiométrica das imagens, onde não foram inseridas as imagens da placa de calibração nem procedido com a calibração oferecida pelo sensor presente no drone. Já o segundo processamento Sensor DJI (B), foi utilizado somente o DJI Sunlight Sensor (Sensor de Luz Solar) embarcado de fábrica no drone utilizado. Para o terceiro processamento Placa de Calibração (C), foram inseridas além das imagens efetuadas em voo, também as imagens do painel de calibração radiométrica MicaSense e então procedido com o ajuste das fotos. Por fim, um quarto processamento, o qual denominamos Placa e Sensor (D), onde fora realizada a calibração com a placa e também o ajuste oferecido pelo sensor de luz solar presente no Mavic 3M.

Os demais procedimentos para a geração dos índices a serem comparados seguiram os mesmos critérios: iniciando pela importação das imagens no *software Agisoft Metashape Pro*, alinhamento das imagens, construção da malha tridimensional, construção do modelo digital de elevação do terreno e então a construção do ortomosaico. Ao fim, obteve-se quatro ortomosaicos, todos oriundos das mesmas imagens, porém com calibrações radiométricas diferentes, conforme apresentado na Figura 2.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2 – Mapas do índice MPRI com as diferentes calibrações.



Fonte: Autores (2025)

Na preparação dos dados para comparação, foram exportados os quatro ortomosaicos, seguindo as mesmas configurações, em coordenadas UTM e com resolução de 1 cm de pixel. Esses produtos foram inseridos no *software QGIS* Ver. *3.28.12* onde foi realizado, em primeiro momento, o recorte das imagens, totalizando cada uma com área de 0,5 há. Posteriormente, procedeu-se com o cálculo de índice (via ferramenta Calculadora Raster). No segundo momento criou-se uma grade virtual, com polígonos de 1 m x 1 m totalizando 5.000 quadrantes georreferenciados (Figura 3), no qual foram extraídos dados estatísticos (via ferramenta Estatística Zonal) pertinentes a cada um dos ortomosaicos, para as quatro calibrações diferentes.

Figura 3 – Grade virtual com polígonos de 1m x 1m.



Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

Para o estudo em questão, foi escolhido o valor médio do índice MPRI calculado em cada um dos processamentos (valor médio dos 10.000 pixels presentes em cada um dos 5000 polígonos). Os dados estatísticos foram filtrados e então resultaram em uma tabela composta por 5000 valores, organizados em cinco colunas, sendo elas: id (identificador); Placa de Calibração (média do MPRI obtido com a calibração oferecida pela placa MicaSense); Sem Calibração (média do MPRI obtido sem nenhuma calibração); Sensor DJI (média do MPRI obtido com a calibração fornecida pelo sensor do drone); e Placa e Sensor (média do MPRI obtido com a calibração oferecida pela placa e a calibração oferecida pelo sensor do drone).

Após a filtragem, os dados foram anexados a um arquivo do tipo .txt, que foi importado no *software* RStudio Versão 4.5.1, onde foram procedidos os testes para a verificação da normalidade e então executada a análise de correlação de Pearson. O teste estatístico de Shapiro-Wilk foi utilizado para verificar se um conjunto de dados segue uma distribuição normal. Conceito: Hipótese nula (H_0): a amostra segue uma distribuição normal; Hipótese alternativa (H_1): a amostra não segue uma distribuição normal. O teste estatístico Shapiro-Wilk é obtido por meio da fórmula:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} a_i \, x_{(i)}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$

Em que:
- $x_{(i)}$ = valores ordenados da amostra (do menor para o maior);
- $\bar{x}$ = média da amostra; e
- a_i = coeficientes derivados da variância e covariância dos valores esperados de ordem de uma amostra normal.

Como parte central desta análise, foram realizados testes de correlação para investigar as relações entre os diferentes métodos de ajustes. Os testes foram conduzidos também no RStudio, utilizando o coeficiente de correlação de Spearman, considerando a natureza dos dados e a necessidade de avaliar a força das associações entre as variáveis nos métodos testados. O objetivo principal foi identificar se existiam correlações significativas entre os métodos de calibração e como essas relações poderiam influenciar os resultados obtidos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O processamento das imagens com as quatro variações de calibração gerou um volume significativo de dados. A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva dos valores médios do índice MPRI obtidos para cada um dos métodos de ajuste avaliados.

A partir dos resultados obtidos, foi possível observar que o ajuste realizado utilizando exclusivamente a placa de calibração apresentou a maior média do índice em estudo, alcançando o valor de 0,3058. Por outro lado, o ajuste que combinou a placa de calibração com o sensor do drone obteve a menor média, com um valor de 0,1292. Essa diferença sugere que a adição do sensor do drone nas imagens já calibradas pela placa pode ter sido influenciado de maneira significativa o comportamento do índice.

Além disso, a maior variabilidade foi registrada no ajuste combinado, que apresentou o desvio padrão de 0,1736 e um intervalo de 1,0628, evidenciando uma dispersão dos dados. Esses resultados indicam que a combinação dos dois métodos de calibração resultou em maior instabilidade nos dados, o que pode ser um reflexo da interação entre os dois instrumentos.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 1 - Estatística descritiva para cada método de processamento de imagens e obtenção do MPRI.

Métrica	Sem Calibração	Sensor DJI	Placa de Calibração	Placa e Sensor
Média	0,2296	0,2539	0,3058	0,1292
Erro Padrão	0,00133	0,00148	0,00148	0,00246
Mediana	0,2343	0,2773	0,3295	0,1545
Desvio Padrão	0,0937	0,1048	0,1048	0,1736
Assimetria	-0,3243	-1,1647	-1,157	-0,508
Curtose	0,3748	1,3986	1,3037	-0,3217
Mínimo	-0,1436	-0,1954	-0,1492	-0,4846
Máximo	0,4974	0,4527	0,5017	0,5781
Intervalo	0,641	0,6481	0,6509	1,0628

Fonte: Autores (2025)

Em contraste, diferentes métodos de calibração das imagens, a partir dos ajustes realizados pelo sensor do drone e pela placa de calibração, quando considerados isoladamente, apresentaram médias e variâncias bastante próximas. Esse comportamento sugere que ambos os métodos produziram resultados consistentes, com uma variabilidade controlada, o que pode ser interpretado como uma evidência de que tanto a placa de calibração quanto o sensor do drone são ferramentas eficazes e semelhantes no processo de obtenção dos índices estudados.

Os resultados obtidos nas quatro configurações testadas foram submetidos ao teste de normalidade Shapiro-Wilk, que foi realizado no *software* RStudio. O teste foi aplicado com o objetivo de avaliar se os dados seguiram uma distribuição normal, o que é uma suposição comum em muitas análises estatísticas. Após a aplicação do teste, os resultados indicaram que os valores médios de MPRI para todos os métodos analisados não apresentaram distribuição normal. Isso foi confirmado pelos *p-values* obtidos, que foram inferiores a 0,05, o que sugere uma rejeição da hipótese nula de normalidade para todos os métodos de coleta de índices de vegetação testados.

A Tabela 2, mostra os resultados dos testes de correlação de Spearman, que fornecem uma visão mais detalhada das interações entre os ajustes e sua eficácia.

A análise da correlação entre os diferentes métodos de calibração das imagens, no cálculo do IV (MPRI), revelou tendências significativas sobre o desempenho de cada ajuste. Os métodos baseados na Placa de Calibração e no Sensor do DJI apresentaram a maior correlação entre si, com um valor de 0,99. Isso indica que ambos os ajustes produzem resultados muito semelhantes, evidenciando a eficácia individual tanto da placa radiométrica quanto do sensor de luz solar para fornecer correções consistentes no índice de vegetação.

Em contraste, a correlação do método Sem Calibração com os outros métodos foi moderada. Um exemplo, é a correlação de 0,68 entre os resultados Sem Calibração e os obtidos com a Placa de Calibração. Isso sugere que, embora o processamento de imagens oriundas de drones, sem nenhum ajuste, mantenha uma tendência geral similar aos corrigidos,

ISBN 978-65-990392-6-3

porém, tende a subestimar os valores do MPRI, refletindo limitações em captar variações radiométricas de forma precisa.

Tabela 2 - Análise de correlação de Spearman entre os métodos de processamentos de imagens e obtenção do MPRI.

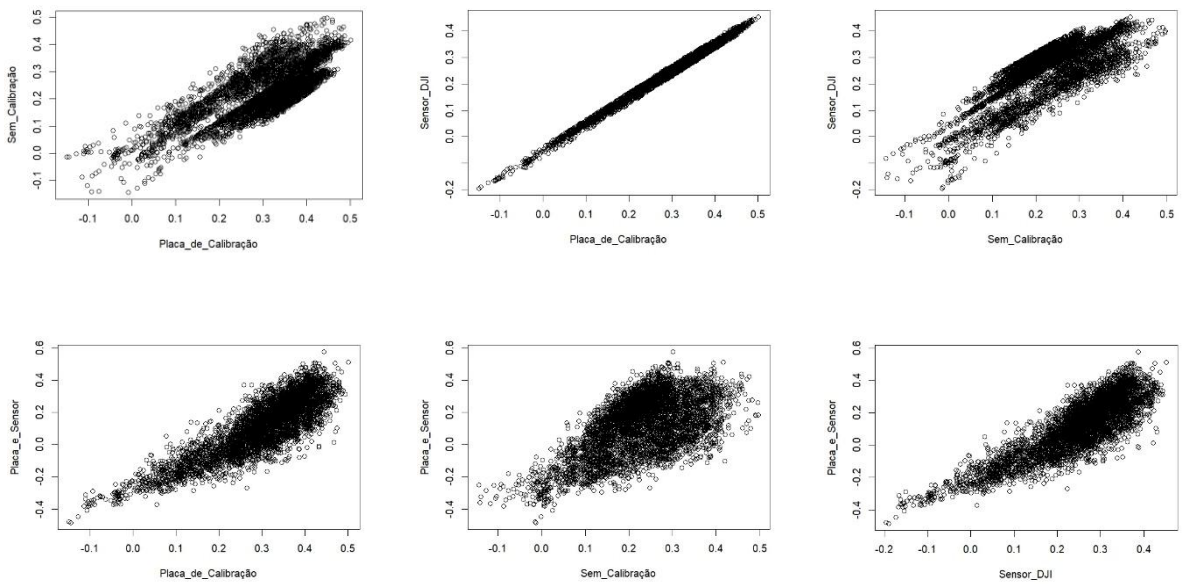
	Placa de Calibração	Sem Calibração	Sensor DJI	Sensor e Placa
Placa de Calibração	-			
Sem Calibração	0,68***	-		
Sensor DJI	0,99***	0,71***	-	
Sensor e Placa	0,82***	0,49***	0,82***	-

Legenda: *** significativo ao nível de 0,1%
Fonte: Autores (2025)

A menor correlação foi observada entre o ajuste combinado (Sensor DJI e Placa de Calibração) e o método Sem Calibração, com um valor de 0,49. Esse resultado reforça a discrepância significativa entre os ajustes combinados e os dados sem correção, sugerindo que a combinação de ambos os ajustes pode amplificar as diferenças radiométricas. Essa maior variabilidade indica que a aplicação conjunta dos dois ajustes pode, em alguns casos, intensificar as discrepâncias nos valores de MPRI em relação aos ajustes individuais.

Na Figura 4, são apresentados os gráficos das correlações obtidas entre os diferentes métodos de calibrações das imagens.

Figura 4 – Correlações dos resultados para os diferentes métodos de processamento de imagens e obtenção do MPRI.



Fonte: Autores (2025)

Os resultados gerais deste estudo destacam a relevância dos ajustes radiométricos para a precisão e confiabilidade dos dados de vegetação. Tanto a Placa de Calibração quanto o Sensor DJI, quando utilizados individualmente, garantem resultados consistentes e altamente

correlacionados. Por outro lado, a ausência de ajustes resultou em subestimação dos valores de MPRI e na menor correlação com os métodos corrigidos, reforçando a importância da calibração para assegurar a qualidade dos dados.

Por fim, o ajuste combinado mostrou maior dispersão nos resultados, indicando que sua aplicação pode não ser indicada pois aumenta as discrepâncias, fazendo que o índice obtido distancie daqueles obtidos por apenas um método de calibração, seja a placa ou o sensor presente no drone. O teste de correlação sugere que o uso isolado de um dos ajustes - sensor solar ou a placa de calibração radiométrica - é suficiente para garantir correções robustas e precisas em índices como o MPRI, com menor variabilidade e alta confiabilidade nos resultados.

4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados da análise estatística e dos testes de correlação, conclui-se que os diferentes métodos de ajuste radiométrico impactam significativamente os valores do MPRI. Os métodos Placa de Calibração e Sensor DJI mostraram-se eficientes quando aplicados individualmente, sendo capazes de corrigir adequadamente o índice de vegetação.

Em contrapartida o método que utilizou a Placa aliada a correção do Sensor resultou em maior variabilidade, com correlações mais baixas, principalmente com o método Sem Calibração. Isso sugere que a combinação dos ajustes introduz variações adicionais, não sendo assim recomendada a sua utilização.

REFERÊNCIAS

AEGRO. **NDVI**: Entenda o que são e como utilizá-lo na fazenda. Blog da Aegro, 16 abr. 2020. Disponível em: https://blog.aegro.com.br/ndvi/. Acesso em: 11 set. 2025.

ALMEIDA, Samira Luns Hatum. **Monitoramento da maturação do café arábica utilizando câmera digital modificada a bordo de veículo aéreo não tripulado**. 2019. 51 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

BENIAICH, A. et al. Determination of vegetation cover index under different soil management systems of cover plants by using an unmanned aerial vehicle with an onboard digital photographic camera. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 40, n. 1, 2019.

CANDIAGO, S.; REMONDINO F.; GIGLIO, de M.; DUBBINI, M.; GATTELI, M. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images**. Remote Sensing**, Basel, v. 7, n. 4, p. 4026-4047, 2015.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Safra brasileira de grãos.** 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 07 dezembro 2024.

FERREIRA, M. P, ZORTEA, M, ZANOTTA, D. C, SHIMABUKURO, Y. E, SOUZA FILHO, C.R. Mapping tree species in tropical seasonal semi-deciduous forests with hyperspectral and multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, Volume 179, 66-78, 2016.

GAMEIRO, S. et al. Avaliação da cobertura vegetal por meio de índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) na Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, CE. **Terræ**, v. 13, n. 1-2, p. 15-22,

ISBN 978-65-990392-6-3

2016. Disponível em: <https://www.ige.unicamp.br/terrae/V13/PDFv13/TE067-2.pdf>. Acesso em: 07 dezembro 2024.

Jorge, L. A. de C. e Inamasu, R. Y. (2014). Uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) em agricultura de precisão. In: Embrapa Instrumentação. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1003485/uso-de-veiculos-aereos-nao-tripulados-vant-em-agricultura-de-precisao. Acesso em: 8 set. 2025.

LEITE, A. P., SANTOS, G. R., SANTOS, J. É. O., 2017. Análise Temporal dos Índices de Vegetação NDVI E SAVI na Estação Experimental de Itatinga Utilizando Imagens Landsat 8. **Revista Brasileira de Energias Renováveis** [online] 6. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5380/rber.v6i4.45830>. Acesso: 06 dezembro 2024.

LI, S.; LI, M. Yield estimation of winter wheat in early growth periods by vehicle-borne ground-based remote sensing system. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 30(3), 120-127, 2014.

LINHARES, M. M. A.; ROCHA, N. C. C.; AMARAL, B. A. S. Análise do índice MPRI como indicador vegetativo através da correlação do mesmo com o índice NDVI. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Foz do Iguaçu, PR, Brasil: 2013. **Anais do ...** Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1190.pdf>. Acesso em: 06 dezembro 2024.

LÓPEZ, D. H.; GARCÍA, B. F.; PIQUERAS, J. G.; ALCÁZAR, G. V. An approach to the radiometric aerotriangulation of photogrammetric images. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 66, n.6, p. 883-893, 2011.

SENSIX. **O que são índices de vegetação e qual seu uso prático?** 2024. Disponível em: <https://suporte.sensix.ag/o-que-sao-indices-de-vegetacao-e-qual-seu-uso-pratico>. Acesso em: 06 dezembro 2024.

SAKAMOTO, T.; GITELSON, A. A.; NGUY-ROBERTSON, A. L.; ARKEBAUER, T. J.; WARDLOW, B. D.; SUYKER, A. E.; VERMA, S. B.; SHIBAYAMA, M. An alternative method using digital cameras for continuous monitoring of crop status. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 154, p. 113-126, 2012.

SOBRINHO, Joaquim Soares et al. **Resposta de genótipos de trigo às diferenças de ambientes de clima tropical e temperado em Minas Gerais.** Passo Fundo, RS: Embrapa Trigo, 2022. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1146349/1/BPD104-online.pdf. Acesso em: 07 dezembro 2024.

TURRA, M. A. **Manejo do nitrogênio em cultivares de trigo baseado no índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). 2016.** Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre – RS, 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/172090/001058376.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 06 dezembro 2024.

VON BUEREN, S. K.; BURKART, A.; HUENI, A.; RASCHER, A.; TUOHY, M. P.; YULE, I. J. Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: challenges and limitations. **Biogeosciences**, Göttingen, v. 12, n. 1, p. 163, 2015.

YANG, Z.; WILLIS, P.; MUELLER, R. **Impact of Band-Ratio Enhanced AWIFS Image to Crop Classification Accuracy**. MD: ASPRS, 2008. Disponível em: <https://www.asprs.org/a/publications/proceedings/pecora17/0041.pdf>. Acesso em: 06 dezembro 2024.

CAPÍTULO 58

ADUBAÇÃO POTÁSSICA COM BASE NA VARIABILIDADE ESPACIAL: ESTRATÉGIAS PARA UMA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL

Potassium fertilization based on spatial variability: strategies for sustainable agriculture

Amanda Trentin Moro[1]; Antônio Luis Santi[1]; Amanda Fornari[1]; Renan da Rosa[1]; Brenda Giovanna Binotto Brandt[1]; Willian José Junges[1]; Igor Cotica Gnoatto[1]; André Felipe de Conti[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria – Campus Frederico Westphalen – Departamento de Ciências Agrárias, BR386 Km Linha 7 de Setembro, 98400000, Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul, Brasil, **a**manda.moro@acad.ufsm.br, santi.pratica@yahoo.com, amanda.fornari@acad.ufsm.br, renandarosa1@gmail.com, brenda.binotto@acad.ufsm.br
Willian.junges@acad.ufsm.br, igor.cotica@acad.ufsm.br, decontiagro@gmail.com

RESUMO

Na agricultura moderna, a busca por inovação é crucial para otimizar a produtividade de forma sustentável, sendo os sistemas de informação e as tecnologias de taxa variável ferramentas essenciais. O manejo adequado de nutrientes, como o potássio, é vital para o desenvolvimento das plantas, impactando diretamente a fotossíntese, a resistência a doenças e a regulação hídrica. este estudo, conduzido em uma área de 395,56 hectares em Ronda Alta, Rio Grande do Sul, teve como objetivo principal avaliar a disponibilidade de potássio no solo e gerar recomendações de adubação para aplicação em taxa variável. O trabalho envolveu etapas como a delimitação da área, análise de amostras de solo e a criação de mapas detalhados. A finalidade foi otimizar o uso de insumos agrícolas, reduzir desperdícios e minimizar impactos ambientais no cultivo de soja, contribuindo para uma gestão agrícola mais eficiente e sustentável.

Palavras-chave: Potássio. Fertilidade. Adubação por taxa variável.

ABSTRACT

In modern agriculture, the pursuit of innovation is crucial to optimize productivity in a sustainable way, with information systems and variable-rate technologies being essential tools. The proper management of nutrients, such as potassium, is vital for plant development, directly impacting photosynthesis, disease resistance, and water regulation. This study, conducted on a 395.56-hectare area in Ronda Alta, Rio Grande do Sul, had asits main objective to evaluate the availability of potassium in the soil and to generate fertilization recommendations for variable-rate application. The work involved stages such as area delimitation, soil sample analysis, and the creation of detailed maps. The purpose was to optimize the use of agricultural inputs, reduce waste, and minimize environmental impacts in soybean cultivation, contributing to a more efficient and sustainable agricultural management.

Keywords: Potassium. Fertility. Variable rate fertilization.

1 INTRODUÇÃO

A busca incessante por inovação se estabeleceu como um fator crítico em todos os setores produtivos, especialmente na agricultura. Nesse campo, o uso de tecnologias de ponta

ISBN 978-65-990392-6-3

e a adoção de práticas sustentáveis são cruciais para a produtividade e a preservação ambiental. Em meio a esse cenário, a agricultura de precisão emerge como uma abordagem revolucionária. Ao se valer de uma vasta quantidade de informações, essa metodologia permite o estabelecimento de relações espaciais detalhadas entre os atributos do solo e a produtividade das culturas, conforme observado por Amado & Giotto (2009). Segundo Monteiro et al. (2021), as técnicas de fertilização de precisão representam o futuro da agricultura, permitindo o fornecimento controlado de nutrientes e reduzindo as perdas ambientais.

Além dos avanços globais, é importante destacar que a adoção da agricultura de precisão no Brasil tem crescido de forma expressiva nos últimos anos, em especial no cultivo de grãos. Estimativas apontam que aproximadamente 67% da área de soja no país já utiliza alguma ferramenta de agricultura de precisão, refletindo uma tendência de modernização e maior competitividade do setor agrícola (Balastreire, 2014). Esse avanço está diretamente associado à necessidade de conciliar altas produtividades com práticas ambientalmente responsáveis.

O uso de ferramentas de geoprocessamento, tem se mostrado uma metodologia extremamente eficaz para determinar os níveis de nutrientes no solo. Outro aspecto relevante diz respeito à sustentabilidade do uso de fertilizantes. O potássio, em particular, representa um dos macronutrientes mais exportados pelas culturas agrícolas e tem papel estratégico na manutenção da fertilidade do solo. Contudo, a disponibilidade global de fontes de K é limitada e concentrada em poucos países, o que gera dependência externa e volatilidade de preços (FAO, 2019).

O manejo adequado de insumos agrícolas, em particular os nutrientes, é vital para garantir a sustentabilidade da produção. Isso envolve a análise precisa da variabilidade espacial dos solos, o que pode ser alcançado de forma eficiente pela integração de tecnologias como os Sistemas de Informações Geográficas (SIG). De acordo com Jin et al. (2002), os nutrientes essenciais apresentam significativa variabilidade espacial em diferentes sistemas de cultivo, reforçando a necessidade de práticas de manejo específicas para cada área.

A metodologia integrou análise de dados de solo, técnicas de interpolação e o cálculo de necessidade de adubação para otimizar a aplicação de insumos agrícolas, destaca-se pela abordagem qualiquantitativa, ao coletar e analisar dados laboratoriais de fertilidade, e pela aplicação prática, fornecendo mapas detalhados que auxiliam no planejamento agrícola.

Como ressaltam Capoia e Bernardi (2017, p. 45), “a agricultura de precisão é um conjunto de ferramentas e tecnologias que leva em conta a variabilidade espacial da propriedade para maximizar o retorno econômico e minimizar os riscos de danos ao meio ambiente¨.

O objetivo principal deste estudo foi desenvolver recomendações de adubação em taxa variada, visando tanto a eficiência econômica quanto a sustentabilidade ambiental. Além disso, a adoção da agricultura de precisão está diretamente relacionada ao aumento da produtividade e à mitigação dos impactos ambientais, como a redução do uso de fertilizantes e defensivos agrícolas (MOLIN & GIMENES, 2012).

Estudos recentes também apontam que o uso de técnicas de taxa variável não apenas melhora a eficiência do uso de fertilizantes, mas contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que reduz a pegada de carbono associada à produção e transporte de insumos (Santos et al., 2022). Dessa forma, o presente estudo se insere em um contexto global de busca por estratégias agrícolas que conciliem rentabilidade e sustentabilidade ambiental.

A agricultura de precisão, nesse sentido, não deve ser vista apenas como um conjunto de ferramentas tecnológicas, mas como uma filosofia de manejo agrícola que busca integrar dados, conhecimento e prática. Essa abordagem se fundamenta na ideia de que cada talhão,

ISBN 978-65-990392-6-3

ou mesmo cada metro quadrado de uma lavoura, apresenta necessidades específicas de insumos. O uso de mapas temáticos, aliado a modelos preditivos, permite que a tomada de decisão seja mais fundamentada, aumentando a resiliência dos sistemas de produção frente a variações climáticas e de mercado. Este estudo foi realizado em uma área de 395,56 hectares na cidade de Ronda Alta, Rio Grande do Sul. O foco foi gerar dados detalhados sobre a disponibilidade de potássio no solo para fornecer recomendações específicas para o cultivo de soja.

A análise de dados permite identificar com maior precisão as necessidades de nutrientes em cada parte da propriedade, resultando em um planejamento agrícola mais eficiente e sustentável. Outro ponto relevante refere-se ao papel da adubação potássica dentro da fisiologia vegetal. O potássio atua como regulador osmótico, influenciando a abertura e o fechamento dos estômatos, o que impacta diretamente na fotossíntese e na eficiência do uso da água. Além disso, esse nutriente participa na ativação de mais de 60 enzimas relacionadas ao metabolismo primário das plantas. Em culturas como a soja, cuja produtividade é altamente dependente da eficiência fotossintética, a disponibilidade adequada de potássio representa não apenas um fator de incremento produtivo, mas também de estabilidade diante de estresses bióticos e abióticos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A pesquisa foi conduzida no município de Ronda Alta, no estado do Rio Grande do Sul, localizado nas coordenadas geográficas 27°47’16,43” de latitude, 52°44’54,45” de longitude e a uma altitude de 689 metros. O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico, e o clima, segundo a classificação de Köppen, corresponde ao tipo subtropical úmido. O estudo utilizou ferramentas de análises de dados para verificar a disponibilidade de potássio no solo de uma área de 395,56 hectares.

A metodologia integrou análise de dados de solo, técnicas de interpolação e o cálculo de necessidade de adubação para otimizar a aplicação de insumos agrícolas. Destaca-se pela abordagem qualiquantitativa, ao coletar e analisar dados laboratoriais de fertilidade, e pela aplicação prática, fornecendo mapas detalhados que auxiliam no planejamento agrícola.

Para realização deste projeto, se fez uso do sistema de informação geográfica ArcGIS, a aplicação em taxa variável pode ser realizada de duas formas: baseada em mapas (prescrição pré-planejada) ou baseada em sensores (ajuste em tempo real), ambas amplamente utilizadas na agricultura de precisão (Li et al., 2020).utilizou se as ferramentas disponíveis para se gerar os planos de informação a partir de dados de nutrientes coletados a campo, no presente estudo o potássio, esses dados serviram de base para o processo.

Também foi utilizado Google Earth, de onde foram extraídos os limites na forma de polígono da área definida, localizada no município de Ronda Alta, Estado do Rio Grande Do Sul. Etapa no qual após identificado o local de pesquisa delimita-se o mesmo, para tal utilizou-se da ferramenta delimitação no Google Earth, e exportou-se o mesmo como arquivo shape para o sistema de informação geográfico.

Os pontos amostrais foram gerados de forma aleatória dentro dos limites definidos da área. Após a geração inicial, a distribuição foi ajustada para excluir áreas não cultiváveis, como estradas e corpos d'água, e adicionar pontos em regiões que necessitavam de maior cobertura amostral. Essa etapa garantiu a representatividade das amostras no mapeamento da fertilidade do solo.

ISBN 978-65-990392-6-3

2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados

Os dados de fertilidade foram obtidos por meio de amostras de solo coletadas a campo no dia 19/06/2024, os valores do nutriente potássio (K) foram registrados em unidades de mg/dm³ e posteriormente convertidos para kg/ha dentro do software ArcGIS, utilizando funções de edição de tabelas atribuídas às camadas de pontos. A necessidade de adubação foi calculada com base na diferença entre os valores de fertilidade medidos e os valores de referência recomendados para a cultura da soja. Os resultados foram organizados em colunas e indexadas ao banco de dados criado no ArcGIS, aplicando-se cálculos automatizados para cada ponto. Em regiões onde o teor de potássio já estava acima do valor de referência, a necessidade de adubação foi ajustada para zero, evitando a superdosagem de fertilizantes.

Os dados de fertilidade e necessidade de adubação foram interpolados para criar superfícies contínuas e preenchimento de dados em vazios espaciais, permitindo a visualização detalhada da variabilidade espacial em toda a área de estudo, estudos semelhantes confirmam que os parâmetros do solo variam espacialmente dentro do campo, exigindo a aplicação variável de insumos conforme os níveis de nutrientes disponíveis (Mwendwa et al., 2022). Para isso, foram utilizadas ferramentas do ArcGIS, na rotina de análise de dados espaciais, executou-se o algoritmo de interpolação IDW (Interpolador de pesos do inverso das distancias) que gerou planos de informação interpolados em coordenadas projetadas no sistema UTM. As simbologias e gradientes de cores dos mapas foram ajustados para facilitar a interpretação e a comunicação dos resultados.

O plano de informação interpolados foi convertida para pontos, possibilitando a análise quantitativa da adubação total necessária na área. Este processo foi fundamental para consolidar as informações e subsidiar decisões sobre a aplicação de fertilizantes. O total de potássio necessário foi calculado a partir das estatísticas da camada resultante, proporcionando um panorama claro para o planejamento agrícola.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados consolidados indicaram a necessidade total de potássio para a área de estudo, sendo utilizados para embasar o planejamento agrícola e a aplicação de insumos. Estes dados permitem calcular o custo total da adubação, auxiliando os produtores na tomada de decisão e no gerenciamento econômico. Além disso, o impacto ambiental foi considerado ao ajustar a dosagem para evitar excessos, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis.

Além da sustentabilidade, o uso da adubação em taxa variável proporciona ganhos fisiológicos importantes para a cultura da soja, uma vez que o potássio desempenha papel fundamental na fotossíntese, na ativação enzimática e na regulação osmótica. Dessa forma, áreas devidamente supridas com o nutriente tendem a expressar maior potencial produtivo e maior resistência a estresses bióticos e abióticos, aspectos já evidenciados por estudos que relacionam a disponibilidade de K à estabilidade da produção (CQFS-RS/SC, 2016; FERNANDES et al., 2020).

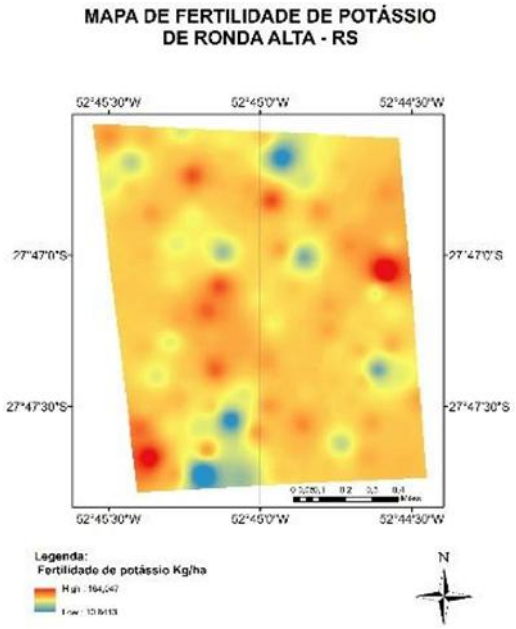
Utilizou-se como referência para a recomendação de adubação do elemento potássio o valor de 350 kg/ha, baseado no prescrito no *Manual de Adubação e Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina* (CQFS-RS/SC, 2004), sendo este o documento normativo que orienta as práticas de calagem e adubação na região. O valor foi ajustado conforme o planejamento agrícola da área de estudo. A literatura aponta que mapas de fertilidade e de recomendação de adubação são ferramentas de alto valor no manejo agrícola, pois permitem identificar zonas de manejo e direcionar práticas de cultivo específicas para

ISBN 978-65-990392-6-3

cada ambiente produtivo (MOLIN et al., 2015). Esse detalhamento auxilia não apenas na definição da adubação, mas também no planejamento de práticas complementares, como a calagem localizada e a escolha de cultivares mais adaptadas às condições de cada talhão.

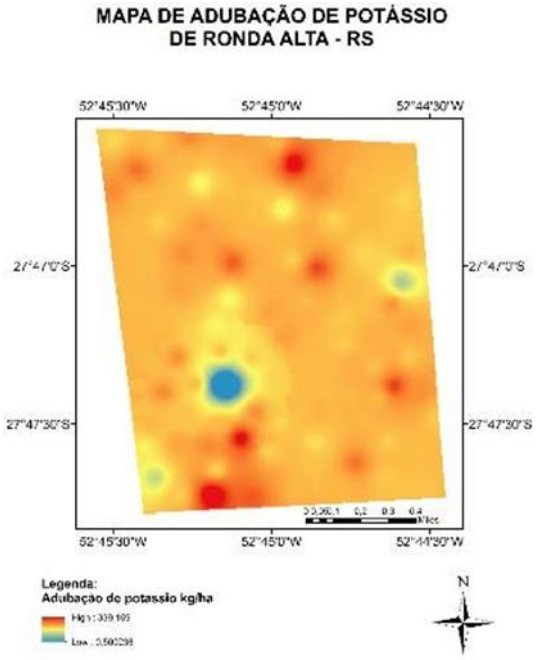
Os mapas finais foram elaborados para representar graficamente a fertilidade do solo e as recomendações de adubação. Elementos como legendas, escalas, sistemas de coordenadas e orientação foram adicionados para assegurar um padrão visual organizado e informativo. Esses mapas são ferramentas essenciais para a tomada de decisão no manejo agrícola, fornecendo informações de fácil compreensão e alto valor técnico.

Figura 1: Mapa de fertilidade de Potássio



Fonte: Amanda Fornari (2024)

Figura 2 – Mapa de Adubação por taxa variada de potássio



Fonte: Amanda Fornari (2024)

ISBN 978-65-990392-6-3

Em um processo de adubação convencional a demanda para a área de estudo de 395,56 hectares seria de 138.446 kg na forma pura, o potássio comercializado principalmente como cloreto de potássio (KCl) com 58% de K_2O, o que implica no uso de 238.700 kg de KCl na formulação. Na região de Ronda Alta, o custo do KCl é de R$ 114,00 por saco de 50 kg. Para atender à demanda total, são necessários 4.774 sacos, resultando em um custo total de R$ 544.236,00.

Em um processo de adubação por taxa variável, o qual trata-se o presente trabalho, cloreto de potássio (KCl) com 58% de K_2O, deve-se aplicar a partir do processo de interpolação 89.495,57 kg, resultando na aplicação de 149.204,43 kg, para isso serão necessários 2.985 sacos, o que resultaria no valor de R$ 340.290,00, o que acarreta em uma economia para a área total de R$ 203.946,00.

A aplicação de insumos em taxa variada oferece uma vantagem significativa ao produtor, pois permite o uso mais eficiente dos fertilizantes, ajustando as doses conforme a real necessidade de cada área. Esse método evita a aplicação uniforme e desnecessária em regiões que já possuem teores adequados de potássio, reduzindo os custos totais e o desperdício de recursos. Além da redução de custos diretos com fertilizantes, a aplicação em taxa variável pode gerar benefícios indiretos de longo prazo. Ao evitar a aplicação excessiva em áreas já supridas, minimiza-se a possibilidade de lixiviação de potássio para camadas mais profundas do solo, preservando a fertilidade de superfície e reduzindo riscos de contaminação de recursos hídricos. Do mesmo modo, áreas com deficiência crítica recebem a quantidade necessária para corrigir a fertilidade, evitando quedas de produtividade que impactariam negativamente na rentabilidade do sistema.

Se o produtor optasse pelo método convencional de adubação, utilizando uma taxa fixa de fertilizante para toda a área, o consumo de KCl seria consideravelmente maior. Isso acontece porque o método não considera a variabilidade espacial da fertilidade do solo, resultando em aplicações excessivas em locais já férteis e insuficientes em áreas mais pobres. Além de elevar os custos da produção, essa prática pode gerar impactos ambientais negativos, como o risco de lixiviação e desperdício de nutrientes. Já o manejo da taxa variável busca equilibrar a aplicação conforme a necessidade de cada ponto da lavoura, proporcionando maior eficiência e sustentabilidade no uso dos insumos.

Quadro 1: Análise comparativa método convencional relacionada a taxa variável.

Dados	Adubação Convencional	Adubação por taxa variável
Necessidade inicial	138.446 kg	89.495,57 kg
Quantidade aplicada	238.700 kg	149.204,43 kg
Valor investido	R$ 544.236,00	R$ 340.290,00
Economia gerada	R$ 0	R$ 203.946,00.

Fonte: Amanda Fornari (2024)

Assim, o uso de tecnologia e dados precisos traduz-se em economia direta e sustentabilidade no manejo agrícola. Conforme apontado por Zhang et al. (2019), as práticas

ISBN 978-65-990392-6-3

de agricultura de precisão reduzem significativamente o uso de fertilizantes e defensivos, ao mesmo tempo em que aumentam a produtividade das culturas.

A análise comparativa entre os métodos convencional e taxa variável evidencia uma economia de aproximadamente R$ 203.946,00 para a área estudada. Esse valor representa não apenas uma redução significativa nos custos de produção, mas também um aumento na margem de lucro do produtor, fator crucial em um cenário de alta volatilidade de preços de insumos agrícolas. Assim, a aplicação em taxa variável atua como uma estratégia de mitigação de riscos econômicos, especialmente em culturas como a soja, cuja rentabilidade é diretamente influenciada pelo custo da adubação.

A expressiva diferença de custos demonstrada na tabela pode atuar como fator motivador para a adoção de práticas de agricultura de precisão, uma vez que evidencia de forma prática os benefícios financeiros obtidos com a utilização dessa tecnologia. Ao perceber o retorno econômico concreto, os produtores tendem a superar barreiras iniciais relacionadas ao investimento em softwares, equipamentos e capacitação técnica, favorecendo a difusão tecnológica no meio agrícola e promovendo um avanço na modernização do setor.

Além disso, a redução de custos não se limita apenas ao aspecto financeiro, mas também se reflete em ganhos indiretos, como o uso mais racional dos fertilizantes, a diminuição de desperdícios e a menor pressão sobre os recursos naturais, contribuindo para uma produção mais sustentável e equilibrada. Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo servem como referência prática para mostrar que a taxa variável não é apenas uma inovação tecnológica, mas uma ferramenta efetiva de gestão econômica, capaz de alinhar lucratividade, eficiência produtiva e responsabilidade ambiental, consolidando-se como um caminho estratégico para a agricultura moderna.

4 CONCLUSÃO

A aplicação de tecnologias avançadas, como os sistemas de informações geográficas (SIG), o geoprocessamento e a agricultura de precisão, é essencial para o fortalecimento da agricultura moderna, pois contribui para a formação de sistemas produtivos mais eficientes, rentáveis e sustentáveis. Este estudo evidenciou que a análise da variabilidade espacial do solo, com foco na disponibilidade de potássio, fornece informações consistentes para um manejo agrícola mais assertivo e embasado em dados concretos.

Essa abordagem permite identificar as necessidades nutricionais específicas de cada área da propriedade, otimizando o planejamento, reduzindo o uso excessivo de insumos e minimizando os impactos ambientais, além de gerar maior segurança nas decisões de manejo. O uso criterioso de fertilizantes também se mostra indispensável para garantir a sustentabilidade do setor, preservando a qualidade dos solos e dos recursos hídricos, ao mesmo tempo em que promove ganhos de produtividade e redução de custos operacionais.

Com isso, fica evidente que o futuro da agricultura depende da integração entre tecnologia, inovação e responsabilidade ambiental, de modo a equilibrar produtividade econômica e conservação dos recursos naturais. A agricultura sustentável exige, portanto, que os dados coletados em campo sejam transformados em decisões concretas de manejo, capazes de assegurar a produtividade sem comprometer a capacidade produtiva das áreas cultivadas, esse equilíbrio permite atender à crescente demanda por alimentos e energia, garantindo não apenas o retorno econômico imediato, mas também a viabilidade produtiva das propriedades rurais para as próximas gerações.

Nesse sentido, fica claro que a adoção de ferramentas de agricultura de precisão não deve ser vista apenas como um recurso tecnológico, mas como uma estratégia de gestão

indispensável para enfrentar os desafios impostos pela intensificação da produção, pelas mudanças climáticas e pela necessidade de preservação ambiental. A consolidação desse modelo de produção demanda também o fortalecimento da pesquisa científica, a capacitação contínua dos profissionais da área e o incentivo a políticas públicas que favoreçam o acesso dos produtores a tecnologias modernas.

Assim, a agricultura caminha para um cenário em que o conhecimento aliado à inovação tecnológica se torna a base para um setor mais competitivo, resiliente e ambientalmente responsável, e garantir a manutenção desse equilíbrio será determinante para assegurar a segurança alimentar global, promover o desenvolvimento socioeconômico das comunidades rurais e consolidar um modelo de produção sustentável, capaz de perdurar no tempo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por ser meu alicerce e sustento em todos os momentos da minha vida. Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Dr. Antônio Luis Santi, pelo apoio, dedicação e orientação ao longo deste trabalho, elementos indispensáveis para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Estendo também meus agradecimentos ao Laboratório de Agricultura de Precisão do Sul (LapSul), pelo aprendizado, pela oportunidade e pela valiosa contribuição em cada etapa desta trajetória.

REFERÊNCIAS

AMADO, T. J. C.; GIOTTO, E. Análise da variabilidade espacial do potássio disponível no solo para a cultura da soja em área de lavoura de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 1159-1168, 2009.

BALASTREIRE, L. A. **Agricultura de precisão**: conceitos e aplicações. 2. ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2014

CAPOIA, E. F.; BERNARDI, A. C. de C. Utilização de ferramentas de agricultura de precisão e geoprocessamento como subsídios da análise da dependência espacial dos dados e geração de zonas de manejo. **Anais** ..., Embrapa Pecuária Sudeste, 2017.

CQFS-RS/SC. Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Porto Alegre: SBCS, 2004.

CQFS-RS/SC. Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **World fertilizer trends and outlook to 2022**. Rome: FAO, 2019. Disponível em: http://www.fao.org/3/ca6746en/ca6746en.pdf. Acesso em: 27 ago. 2025.

ISBN 978-65-990392-6-3

JIN, J.; JIANG, C. Spatial variability of soil nutrients and site-specific nutrient management in the PR China. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 36, n. 2-3, p. 165-172, 2002. DOI: https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00099-6.

LI, Y.; ZHOU, J.; LI, D. et al. Map-based and sensor-based variable rate application technologies in precision agriculture: a review. **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 11, p. 1627, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy10111627.

MOLIN, J. P.; GIMENES, M. A. F. Agricultura de precisão. In: BALDANI, J. I. et al. (Org.). **Ciência e tecnologia na agricultura do futuro**. Campinas, SP: IAC, 2012. p. 177-184.

MONTEIRO, A. N.; SANTOS, J. P.; SOUSA, M. F. et al. Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review. **Animals**, Basel, v. 11, n. 8, p. 2345, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/ani11082345.

MWENDWA, B. M.; KOECH, R. K.; NGUGI, J. K. Spatial variability of selected soil parameters and their implications for site-specific input application in irrigated crop production systems. **Heliyon**, Amsterdam, v. 8, n. 8, e09934, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09934.

SANTOS, J. F.; OLIVEIRA, R. P.; SILVA, M. A. Variable rate fertilization and greenhouse gas mitigation in tropical agriculture. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 357, p. 131921, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131921.

ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture — a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 36, n. 2-3, p. 113-132, 2002. DOI: https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0.



ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 59

VARIABILIDADE ESPACIAL DO pH DO SOLO E A RELAÇÃO COM A SATURAÇÃO DE BASES

The Spatial Variability of Soil PH and Relationship With Base Saturation

Artur Cidade dos Santos[1]; Luciano Zucuni Pes[2]; Lúcio de Paula Amaral[3]; Wagner Nart Macedo[4]

[1] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão (PPGAP), Rua Sargento Ricardo Schultz Marques, n° 85, CEP 97050670, Santa Maria – RS, Brasil, e-mail: artur.acidade.santos@gmail.com
[2] Av. Roraima, 1000, Cidade Universitária, Camobi, Santa Maria-RS, CEP 97.105-900, e-mail: lucianopes@politecnico.ufsm.br;
[3] Av. Roraima, 1000, Cidade Universitária, Camobi, Santa Maria-RS, CEP 97.105-900, e-mail: lucio.amaral@ufsm.br;
[4] Av. Prefeito Evandro Berh, 8091, apto 602, CEP 97110800, Santa Maria – RS, Brasil, e-mail: wnmacedo90@gmail.com

RESUMO

A acidez do solo é um dos principais fatores limitantes da produtividade agrícola, pois influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes e o desenvolvimento radicular. Este estudo avaliou a variabilidade espacial do pH e sua relação com a saturação por bases em áreas agrícolas do Rio Grande do Sul, comparando os anos de 2012 e 2017. Para isso, aplicaram-se análises químicas e geoestatísticas, incluindo o ajuste de semivariogramas e a interpolação por krigagem, a fim de gerar mapas de distribuição espacial. Os resultados indicaram aumento do pH médio de 5,07 para 5,34 e elevação da saturação por bases de 68,7% para 73,9%, evidenciando efeito positivo do manejo da fertilidade. A análise espacial demonstrou dependência moderada a forte, confirmando que os atributos não são distribuídos aleatoriamente e que a geoestatística é eficiente para identificar padrões locais. Assim, conclui-se que a saturação por bases é um indicador-chave da acidez e que o uso de técnicas de Agricultura de Precisão pode otimizar a aplicação de corretivos, reduzir custos e promover sustentabilidade produtiva.

PALAVRAS-CHAVES: pH, Fertilidade do solo, Variabilidade espacial.

ABSTRACT

Soil acidity is one of the main limiting factors of agricultural productivity, as it directly affects nutrient availability and root development. This study evaluated the spatial variability of soil pH and its relationship with base saturation in agricultural areas of Rio Grande do Sul, comparing the years 2012 and 2017. Chemical and geostatistical analyses were applied, including semivariogram modeling and kriging interpolation, to generate spatial distribution maps. Results showed an increase in average pH from 5.07 to 5.34 and a rise in base saturation from 68.7% to 73.9%, evidencing the positive effect of soil fertility management. Spatial analysis indicated moderate to strong dependence, confirming that the attributes are not randomly distributed and that geostatistics is effective in identifying local patterns. Therefore, it is concluded that base saturation is a key indicator of soil acidity and that Precision Agriculture techniques can optimize the application of amendments, reduce costs, and promote productive sustainability.

KEYWORDS: pH, soil fertility, spatial variability.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

Os solos agrícolas brasileiros, em sua maioria, apresentam acidez elevada. Essa característica dificulta o cultivo de grande parte das espécies vegetais, especialmente pela baixa adaptabilidade das plantas a essas condições, tornando necessária a correção do pH do solo. Esse fator é fundamental, pois o desenvolvimento do sistema radicular, a atividade dos microrganismos e a disponibilidade de nutrientes estão diretamente relacionados ao nível de acidez do solo Taiz *et al.* (2017).

O aumento da saturação por bases é o critério mais comum para identificar a necessidade de correção da acidez do solo. A principal prática utilizada para tal é a aplicação de calcário, que corrige a acidez, fornece cálcio (Ca) e magnésio (Mg) ao solo, além de melhorar a disponibilidade de fósforo (P) para as plantas Vieira *et al*., (2020). De acordo com Oliveira *et al*. (2015), o ajuste do pH do solo e o equilíbrio dos teores de bases favorecem a disponibilidade adequada da maioria dos nutrientes essenciais às plantas.

A acidez do solo é um dos principais fatores que limitam a disponibilidade de nutrientes para as plantas e, consequentemente, a produtividade agrícola. O conhecimento da variabilidade espacial do pH permite o uso racional de corretivos, como o calcário, contribuindo para um manejo mais eficiente e sustentável. Ao comparar diferentes anos, é possível entender a dinâmica do solo ao longo do tempo, identificar tendências e ajustar práticas de manejo. Este estudo se insere no contexto da agricultura de precisão, fornecendo informações valiosas para a tomada de decisão baseada em dados, promovendo o uso eficiente de recursos e a preservação ambiental.

A relevância técnica deste estudo reside no suporte à tomada de decisões agrícolas, fornecendo recomendações embasadas em dados geoespaciais precisos que possibilitam o manejo localizado e eficiente dos insumos. Cientificamente, a pesquisa contribui significativamente para o entendimento da dinâmica temporal da fertilidade do solo em sistemas agrícolas, ressaltando a importância da análise espacial como ferramenta indispensável em estudos agronômicos modernos. Do ponto de vista ambiental, o trabalho fomenta práticas sustentáveis ao evitar o uso excessivo de corretivos e fertilizantes, reduzindo os impactos negativos sobre o solo e os ecossistemas adjacentes. Por fim, sob o aspecto econômico, a pesquisa possibilita a otimização dos custos relacionados aos insumos agrícolas e a melhoria da produtividade, promovendo um manejo agrícola mais racional, sustentável e economicamente viável.

Este estudo tem como objetivo avaliar a variabilidade espacial do pH do solo e sua relação com a saturação por bases, a fim de compreender melhor os processos de acidez e subsidiar a aplicação eficiente de corretivos, como o calcário. Além disso, busca-se comparar os atributos de fertilidade do solo nos anos de 2012, 2017 e 2020 em diferentes áreas e com diferentes manejos agrícolas. A análise da distribuição espacial desses indicadores, por meio de técnicas de geoestatística, permite identificar padrões e propor estratégias de manejo localizado, promovendo o uso racional de insumos e contribuindo para a sustentabilidade do sistema produtivo.

A hipótese é que a variabilidade espacial do pH do solo está diretamente relacionada à distribuição da saturação por bases, influenciando a necessidade de aplicação distinta de corretivos ao longo da área de manejo. Além disso, espera-se que, ao comparar os anos de 2012 e 2017, sejam observadas alterações significativas nos atributos de fertilidade do solo, resultantes das práticas de manejo adotadas no período. Ademais, o uso de dados espaciais pode otimizar a aplicação de corretivos, reduzindo custos e impactos ambientais e a agricultura de precisão é eficaz para identificar e manejar a acidez do solo de forma localizada.

ISBN 978-65-990392-6-3

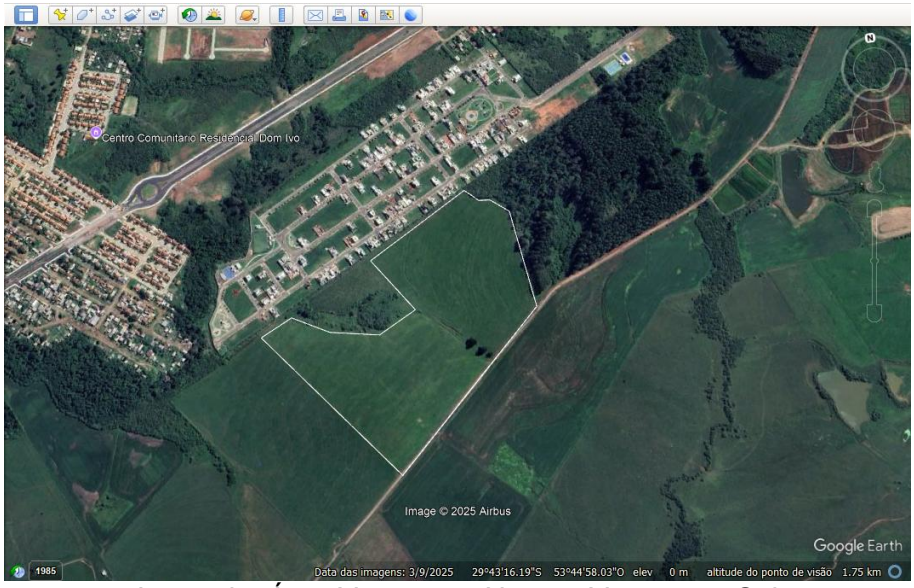
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Este trabalho foi desenvolvido na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), situada no município de Santa Maria, na região central do estado do Rio Grande do Sul (RS). A área de estudo está localizada nas coordenadas geográficas 29º 43’ 22.50” de latitude sul e 53º 45’ 9.18” de longitude oeste, a uma altitude de 113 metros. De acordo com o sistema de classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cfa, subtropical úmido, com verões quentes e sem estação de seca definida (ALVARES *et al.*, 2013). O solo do local é classificado como Argissolo Vermelho distrófico arênico (EMBRAPA, 2018), possui textura média e relevo ondulado.

Os dados usados para realização deste trabalho foram retirados da dissertação de mestrado “determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo”, do autor Daner Seixas Requia (REQUIA, 2022).

Figura 1: Área de análise denominada Vossoroca Norte e Sul



Legenda: Área Vossoroca Norte e Vossoroca Sul
Fonte: Autores (2025)

Os solos da região estudada apresentam predominância de acidez, característica comum em solos agrícolas brasileiros TAIZ *et al.*, (2017). Essa condição afeta diretamente a disponibilidade de nutrientes e, consequentemente, a produtividade das culturas. A relação entre pH e saturação por bases (V%) é um dos parâmetros mais utilizados para compreender a acidez do solo e definir práticas de correção, sendo que aumentos na saturação tendem a elevar o pH. (OLIVEIRA *et al.*,2015; VIEIRA *et al.*, 2020).

2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados

A amostragem do solo foi realizada em uma área agrícola georreferenciada, utilizando uma malha sistemática de pontos a cada 50 metros, cobrindo toda a área de estudo. Em cada ponto, coletaram-se amostras da camada superficial (0-20cm), que é a mais relevante para o

ISBN 978-65-990392-6-3

ciclo de nutrientes. As amostras foram obtidas com trados, homogeneizadas, identificadas e enviadas ao laboratório para análise química. A localização dos pontos foi registrada por GPS, foram anotadas informações sobre manejo, histórico agrícola e relevo para auxiliar na interpretação da variabilidade do solo.

Após as análises químicas, os dados foram organizados e verificados para identificar e corrigir possíveis erros ou valores discrepantes. Em seguida, foram calculadas estatísticas descritivas para caracterizar a distribuição dos atributos do solo, como média, variância e coeficiente de variação. Para avaliar a variabilidade espacial, foi realizada a análise geoestatística, iniciando pelo cálculo do semivariograma experimental, que avalia a dependência espacial dos dados. Modelos matemáticos (esférico, exponencial, gaussiano) foram ajustados ao semivariograma para descrever essa estrutura. Com o modelo escolhido, aplicou-se a krigagem para interpolar os dados e gerar mapas detalhados da distribuição espacial das características químicas do solo. Esses mapas são essenciais para subsidiar o manejo agrícola localizado, otimizando o uso de corretivos e fertilizantes.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os solos da região estudada são predominantemente argilosos. A correlação entre a V% (saturação de bases representado em percentual) e pH sofre variações dependendo das características de cada solo ou região (SILVA et. al, 2008). Em estudo realizado por OLIVEIRA *et al.* (2015), à medida que se elevou o nível de saturação por bases do Cambissolo Háplico, houve aumento de pH proporcional, sendo que acima de 75% de saturação de bases, o pH ultrapassa o ponto de neutralidade.

Tabela 1: Estatística Descritiva – Dados 2012

Variável	Média	V. Max.	V. Min.	S^2	S	Assimetria	Curtose
pHH2O	5,073	5,700	4,400	0,10767	0,328	0,190	-0,670
SB%	68,73	87,100	39,100	147,86	12,160	-0,480	-0,620

Legenda: pHH2O – pH medido em água; SB% –Saturação de Bases; V. Max. – Valor máximo; V. min. – Valor mínimo; S^2 – Variância; S – Desvio Padrão

Fonte: Autores (2025)

Tabela 2: Estatística Descritiva – Dados 2017

Variável	Média	V. Max.	V. Min.	S^2	S	Assimetria	Curtose
pHH2O	5,339	6,100	4,600	0,157	0,397	-0,040	-0,910
SB%	73,897	91,100	46,900	154,704	12,438	-0,690	-0,710

Legenda: pHH2O – pH medido em água; SB% –Saturação de Bases; V. Max. – Valor máximo; V. min. – Valor mínimo; S^2 – Variância; S – Desvio Padrão

Fonte: Autores (2025)

Em 2012, o pHH_2O apresentou média de 5,07, com valores variando entre 4,40 e 5,70, indicando predominância de solos ácidos (Tabela 1). Já em 2017, observou-se elevação da média para 5,34, variando entre 4,60 e 6,10. Essa alteração demonstra melhora na condição de acidez, possivelmente associada à aplicação de corretivos durante o período. Essa

ISBN 978-65-990392-6-3

tendência está em conformidade com Silva *et al.* (2008), que relataram aumento significativo do pH em resposta à elevação da saturação por bases em diferentes classes de solos.

Quanto à saturação por bases (SB%), observou-se crescimento da média entre os anos avaliados: 68,73% em 2012 e 73,90% em 2017 (Tabela 2). Esse aumento evidencia um efeito positivo do manejo de correção da acidez, já que em situações de V% superiores a 75% o pH do solo tende a se aproximar da neutralidade (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Tabela 3: Parâmetros semivariográficos para pHH2O e SB% no ano de 2012

Variável	Modelo	CO	(CO+C)	A	R²	Resisual SS	C/(CO+C)	D.P.	
pHH2O	Gaussian	0,0496	0,1842	694,379	0,994	1,81E-05	0,731	73,100	moderada
SB%	Gaussian	55,8	178,2	593,401	0,981	67,8	0,687	68,700	moderada

Legenda: pHH2O – pH medido em água; SB% –Saturação de Bases; Co – Efeito pepita; (Co+C) – patamar; A – alcance; R² – Coeficiente de determinação; SQR – Soma dos quadrados dos resíduos; C/(C+Co) – Estrutura ou Proporção espacial; D.P. – classe de dependência espacial.

Fonte: Autores (2025)

Tabela 4: Parâmetros semivariográficos para pHH2O e SB% no ano de 2017

Variável	Modelo	CO	(CO+C)	A	R²	Resisual SS	C/(CO+C)	D.P.	
pHH2O	Gaussian	0,0117	0,1724	211,830	0,861	7,21E-04	0,932	93,200	forte
SB%	Gaussian	4,30	189,5	247,510	0,951	419	0,977	97,700	forte

Legenda: pHH2O – pH medido em água; SB% –Saturação de Bases; Co – Efeito pepita; (Co+C) – patamar; A – alcance; R² – Coeficiente de determinação; SQR – Soma dos quadrados dos resíduos; C/(C+Co) – Estrutura ou Proporção espacial; D.P. – classe de dependência espacial.

Fonte: Autores (2025)

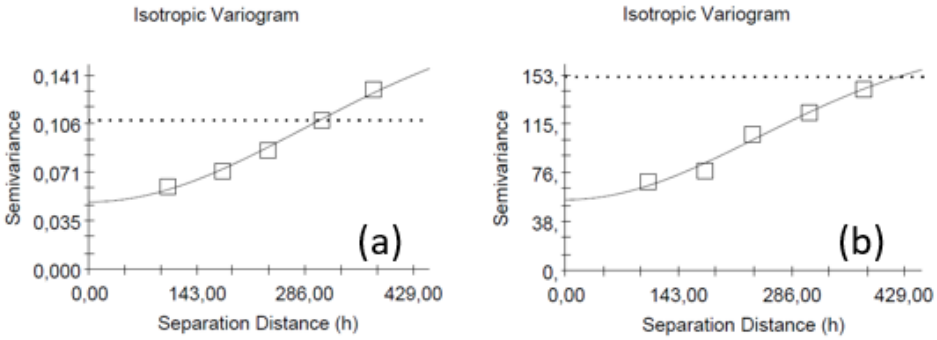
A análise geoestatística mostrou forte estrutura espacial para ambos os atributos nos dois anos avaliados. Para o pHH_2O, o modelo gaussiano apresentou melhor ajuste, com R² de 0,994 em 2012 e 0,861 em 2017, revelando consistência nos padrões de distribuição espacial (Tabela 4). Para a SB%, o ajuste também foi gaussiano, com R² de 0,981 e 0,951, respectivamente. Valores elevados de coeficiente de determinação indicam que a estrutura espacial dos atributos foi bem representada (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

Além disso, a proporção espacial (C/(C+Co)) foi superior a 0,68 em todos os casos, chegando a 0,972 em 2017 para a SB%, o que indica dependência espacial forte, conforme os critérios propostos por Cambardella *et al.* (1994). Esse comportamento confirma que os atributos avaliados não estão distribuídos aleatoriamente, mas apresentam continuidade espacial significativa, condição essencial para o uso de interpoladores geoestatísticos, como a krigagem (VIEIRA, 2000; JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978).

Portanto, a melhora observada no pH e na saturação por bases entre 2012 e 2017 está diretamente relacionada às práticas de manejo, destacando a importância do monitoramento contínuo da fertilidade do solo. A integração entre análise química tradicional e geoestatística possibilita maior eficiência na aplicação de corretivos, otimizando custos e promovendo sustentabilidade produtiva (VIEIRA *et al.*, 2020).

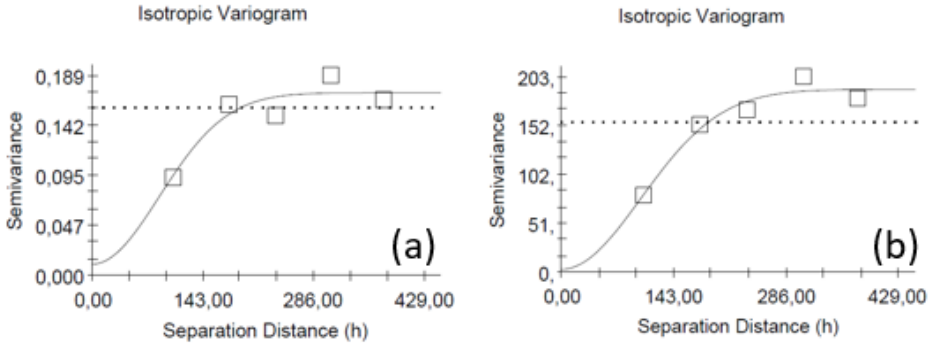
ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2: Semivariogramas 2012



Legenda: Semivariogramas pHH2O (a) e SB% (b) para o ano de 2012
Fonte: Autores (2025)

Figura 3: Semivariogramas 2017



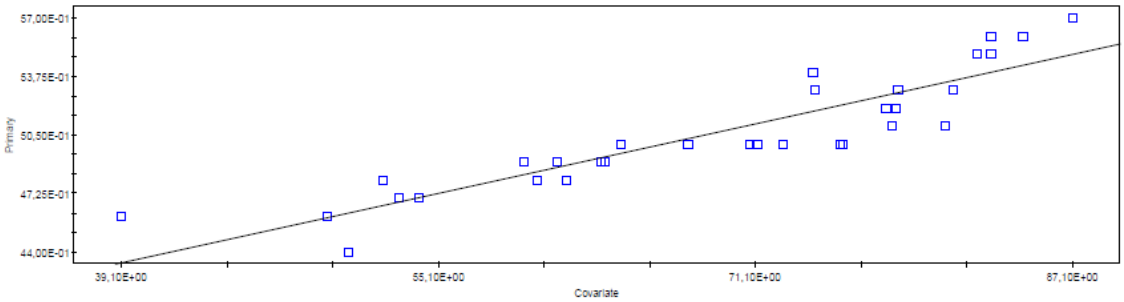
Legenda: Semivariogramas pHH2O (a) e SB% (b) para o ano de 2017
Fonte: Autores (2025)

Tabela 5: Dados de Regressão para pHH2O e SB% no ano de2012 e 2017

Ano	Variável	Erro Padrão	Erro Padrão Estimado	R^2	Equações
2012	pHH$_2$O × SB%	0	0,02	0,816	$\hat{y}$ = 3,400 + 0,02x
2017	pHH$_2$O × SB%	0	0,03	0,830	$\hat{y}$ = 3,192 + 0,03x

Legenda: Resultados da Regressão para pHH2O (a) e SB% (b) para o ano de 2017
Fonte: Autores (2025)

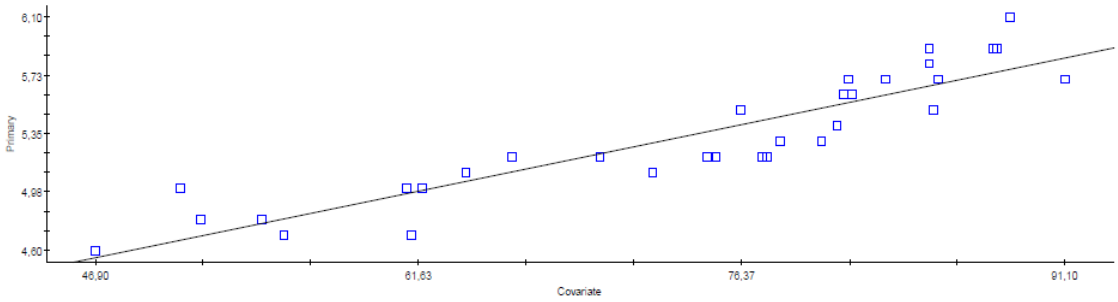
Figura 4: Regressão 2012



Legenda: Gráfico de regressão ano 2012; Equação $\hat{y}$ = 3,400 + 0,02x e R^2 = 0,816
Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 5: Regressão 2017



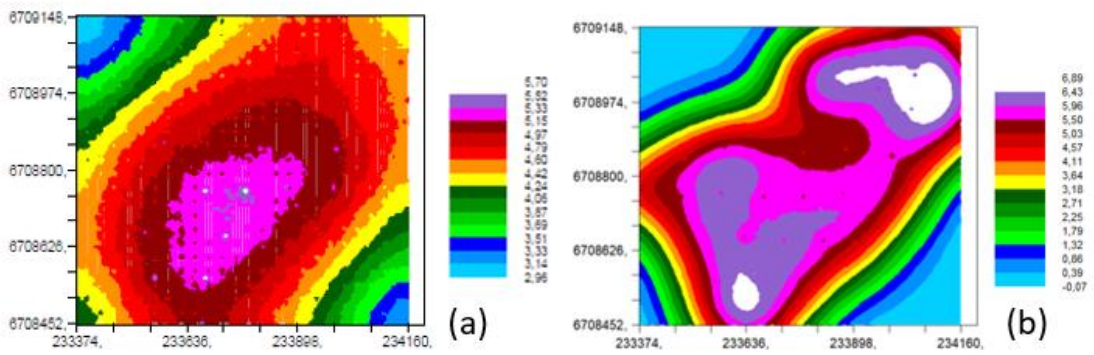
Legenda: Gráfico de regressão ano 2017; Equação ŷ = 3,192 + 0,03x e R² = 0,830
Fonte: Autores (2025)

Os resultados da regressão linear entre pHH_2O e SB% reforçam essa associação positiva. Em 2012, a equação ŷ = 3,400 + 0,02x apresentou coeficiente de determinação de R² = 0,816, indicando boa relação entre as variáveis. Já em 2017, a equação ŷ = 3,192 + 0,03x apresentou R² = 0,830, revelando não apenas um aumento no coeficiente angular, mas também maior ajuste do modelo. Isso demonstra que, ao longo do tempo, a relação entre pH e saturação por bases tornou-se mais consistente, com maior sensibilidade do pH às variações na SB%.

Esses resultados têm implicações práticas no manejo da fertilidade, uma vez que reforçam a importância da saturação por bases como indicador para a recomendação de calagem em diferentes sistemas de cultivo. Em condições de solos altamente intemperizados, como os Latossolos predominantes no Sul do Brasil (ALVARES *et al.*, 2013; EMBRAPA, 2018), a manutenção de níveis adequados de SB% é fundamental para mitigar a acidez e garantir a disponibilidade de nutrientes. Assim, a análise temporal evidencia não apenas a eficácia das práticas de correção, mas também a necessidade de monitoramento contínuo da variabilidade espacial, de modo a subsidiar decisões mais precisas no âmbito da Agricultura de Precisão.

A análise dos mapas de pH revelou significativa evolução entre 2012 e 2017. No primeiro ano, a acidez do solo apresentava ampla variação espacial, com predominância de valores abaixo de 5,0, o que indica condições limitantes para a disponibilidade de nutrientes e para o crescimento radicular. Em 2017, observou-se aumento nos valores médios de pH, com maior concentração de áreas entre 5,0 e 6,0, refletindo os efeitos do manejo de correção da acidez. Esses resultados estão de acordo com Silva *et al.* (2008) e Taiz *et al.* (2017), que destacam a importância do pH no controle da solubilidade de íons tóxicos, como o alumínio, e na disponibilidade de nutrientes essenciais.

Figura 6: Evolução da Distribuição de pHH2O e SB%



Legenda: Mapas de evolução em pHH2O e SB% para os anos de 2012 (a) e 2017(b)
Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

No aspecto geoestatístico, o pH apresentou dependência espacial moderada em 2012, com distribuição heterogênea, e dependência forte em 2017, evidenciando maior continuidade espacial e confiabilidade dos mapas gerados. Para Isaaks & Srivastava (1989) e Cambardella *et al.* (1994), essa evolução indica que o manejo agrícola reduziu a variabilidade local, tornando a interpolação por krigagem mais representativa da realidade do campo. Assim, os mapas de pH de 2017 demonstram não apenas aumento dos valores médios, mas também maior uniformidade da acidez no solo.

De forma semelhante, a saturação por bases (SB%) apresentou ampla variabilidade em 2012, com áreas críticas inferiores a 50%, que indicam baixa fertilidade e necessidade de correção intensiva. Em 2017, houve incremento médio de 68,7% para 73,9%, além de uma distribuição espacial mais homogênea, com predomínio de áreas entre 70% e 90%. Essa evolução é consistente com os efeitos esperados da calagem, prática destacada por Vieira, Weber e Scaramuzza (2020) como fundamental para elevar a saturação por bases e otimizar a disponibilidade de cátions básicos no solo.

Por fim, a relação direta entre pH e saturação por bases foi confirmada no período analisado, pois o aumento da SB% refletiu-se no incremento do pH, como já apontado por Oliveira *et al.* (2015).

Esse comportamento demonstra que o manejo adotado foi eficiente, promovendo melhoria na fertilidade e redução da acidez. A maior dependência espacial observada em 2017 para ambos os atributos indica que o solo respondeu positivamente às práticas de correção, permitindo maior estabilidade e previsibilidade na variabilidade espacial. Esses resultados reforçam a importância do manejo localizado e da agricultura de precisão no monitoramento e na sustentabilidade do sistema produtivo (Montanari, Carvalho, Silveira, 2005; Lima, Silva, Oliveira, 2010).

4 CONCLUSÃO

A comparação entre os anos de 2012 e 2017 evidenciou avanços relevantes no manejo da fertilidade do solo, refletidos no aumento dos valores de pH, na elevação da saturação por bases e na redução de áreas críticas de acidez. A correlação positiva entre pH e saturação por bases mostrou-se consistente, confirmando a importância da SB% como parâmetro confiável para recomendações de calagem. Além disso, a evolução temporal dos atributos químicos do solo demonstrou que as práticas de correção foram eficazes em promover maior equilíbrio químico, reforçando seu papel na manutenção da produtividade agrícola em solos tropicais altamente intemperizados.

Adicionalmente, a análise geoestatística destacou-se como ferramenta essencial para identificar padrões espaciais e subsidiar estratégias de manejo localizado. A dependência espacial mais forte observada em 2017 evidenciou a eficiência da krigagem na geração de mapas precisos, capazes de orientar a tomada de decisão no contexto da Agricultura de Precisão. Em síntese, os resultados demonstram que intervenções adequadas no manejo da fertilidade não apenas favorecem a disponibilidade de nutrientes e reduzem a acidez, mas também otimizam o uso de insumos e promovem a sustentabilidade de longo prazo dos sistemas agrícolas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pelo suporte institucional oferecido para a realização deste trabalho. Estendemos nosso reconhecimento ao professor

Lúcio de Paula Amaral pela orientação e pelas contribuições fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ALVARES, Clayton Alcarde. *et al.* **Koppen's climate classification map for Brazil.** Meteorologische Zeitschrift. 22: 711–728, 2013. Disponível em: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

CAMBARDELLA, C. A. *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil **Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501–1511, 1994. CRESSIE, N. Statistics for Spatial Data. New York: Wiley, 1993.

CARVALHO, M. P.; SILVEIRA, P. M. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 497-506, 2005.

Daner, Seixas Requia. **Determinação da Variabilidade Especial de Características Químicas do Solo**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós- Graduação em Agricultura de Precisão, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) 2022

EMBRAPA-CNPS. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 5.ed. Brasília, 2018. 356p. Disponível em: https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, **C. J. Mining Geostatistics**. London: Academic Press, 1978.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 3, p. 389–396, 2010.

LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. B. Geoestatística aplicada à variabilidade espacial de atributos químicos do solo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 4, p. 554-563, 2010.

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo e produtividade de culturas. **Ciência Rural**, v. 35, n. 2, p. 257–264, 2005.

OLIVEIRA, J. R., Souza, F. V. P., Silva, U. T. G., Duarte, N. F., & Pinto, S. I. C. (2015). Saturação por bases para o cultivo do cedro australiano. **Global Science and Technology**, 8(2), 96-102.

SILVA, V., MOTTA, A. C. V., MELO, V. F., & LIMA, V. C.. Variáveis de acidez em função da mineralogia da fração argila do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:551-559, 2008.

ISBN 978-65-990392-6-3

TAIZ, L., E. Zeiger, I.M. Moller. & A. Murphy. 2017. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal.** Artmed Editora.

VIEIRA, C. R., Weber, O. D. S., & Scaramuzza, J. F. (2020). Saturação por bases no crescimento e na qualidade de mudas de paricá. **Scientia Forestalis**, 48(125), 1-11.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS, 2000. p. 1–54.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 60

INFLUÊNCIA DA ÉPOCA DE SEMADURA NA CORRELAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO MILHO COM O ÍNDICE NDVI

Influence of sowing time on the correlation between maize yield and the NDVI index

Gabriel Kaefer Seganfredo[1]; Luis Gustavo Kern[1]; André Müllich[1]; Luiz Felipe Silveira Pavão[1]; Marcelo S. Farias[1]; Luciano Z. Pes[1]; Ivan C. Maldaner[1]; Jaqueline Sgarbossa[1]

[1] Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria-RS, Brasil, gabrielkseganfredo@gmail.com; kernluizgustavo@gmail.com, andre.mullich@hotmail.com, felipepavao14@gmail.com, marcelo.farias@ufsm.br, lucianopes@politecnico.ufsm.br, ivan.maldaner@ufsm.br, sgarbossa.jaqueline@ufsm.br

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar a correlação entre a produtividade do milho e o índice de vegetação NDVI. O trabalho foi realizado em quatro lavouras comerciais, conduzidas em duas épocas de semeadura (antecipada e tardia), nas safras 2021/2022 e 2024/2025. Foram utilizados dados de produtividade e capturas do satélite Sentinel-2 para a elaboração dos mapas de colheita e dos índices NDVI. Para a análise, calculou-se a correlação entre produtividade e NDVI em cada data, sendo posteriormente considerada a média das melhores imagens. Os resultados indicaram que, a época de semeadura não exerceu influência direta na correlação entre produtividade e NDVI. No entanto, pode haver efeito indireto quando o período de maior resposta espectral da cultura coincide com fases de elevada nebulosidade, reduzindo a qualidade das imagens disponíveis. Esses achados reforçam tanto o potencial do NDVI como ferramenta para estimativa de produtividade, quanto a necessidade de considerar as limitações impostas por fatores meteorológicos em estudos de sensoriamento remoto orbital.

Palavras-chave: *Zea mays* L. Agricultura de Precisão. Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

The present study aimed to analyze the correlation between maize yield and the NDVI vegetation index. The research was conducted in four commercial fields, managed under two sowing times (early and late), during the 2021/2022 and 2024/2025 growing seasons. Yield data and Sentinel-2 satellite images were used to generate harvest maps and NDVI indices. For the analysis, the correlation between yield and NDVI was calculated for each date, and subsequently the average of the best images was considered. The results indicated that the sowing date did not exert a direct influence on the correlation between yield and NDVI. However, an indirect effect may occur when the period of greatest spectral response of the crop coincides with phases of high cloudiness, reducing the quality of the available images. These findings highlight both the potential of NDVI as a tool for yield estimation and the importance of considering the limitations imposed by meteorological factors in orbital remote sensing studies.

Keywords: *Zea mays L.* Precision agriculture. Remote sensing.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

O contexto atual da agricultura no Brasil indica que as atividades agrícolas carecem, cada vez mais, de gestão. A redução das margens financeiras, somada às recorrentes frustrações de safra provocadas pela combinação de altas temperaturas e estresse hídrico, elevada pressão de patógenos e a competição com plantas daninhas de difícil controle, tem levado muitos produtores a terem prejuízos. Ademais, as oscilações dos preços das commodities e dos insumos agrícolas, impõem desafios adicionais ao planejamento de custos e receitas. Neste contexto, torna-se indispensável o uso de ferramentas capazes de apoiar a tomada de decisão, reduzindo incertezas e otimizando o retorno sobre os investimentos.

Dentre as alternativas disponíveis, a Agricultura de Precisão (AP) se destaca como um conjunto de práticas e tecnologias que auxiliam o produtor na gestão espacial e temporal de sua lavoura. Dentre suas aplicações, o Sensoriamento Remoto (SR) tem ganhado relevância, pois permite monitorar o ambiente agrícola por meio da detecção de variações no campo eletromagnético, captadas por sensores em satélites, aeronaves tripuladas ou remotamente pilotadas (NOVO, 2010). A utilização do SR no monitoramento do crescimento e desenvolvimento das culturas tem demonstrado grande potencial, tanto para auxiliar em decisões de manejo, quanto para estimar a produtividade de culturas anuais (ANDRADE, 2022; LOPES, 2019). Além de permitir a identificação de zonas de manejo, essa ferramenta possibilita ajustar os investimentos em insumos de acordo com a expectativa mais realista de produção.

Apesar desse potencial, a definição do melhor momento para a coleta das imagens e a escolha do índice de vegetação adequado, ainda representam desafios importantes. A cultura do milho (*Zea mays* L.) tem sido amplamente pesquisada com este fim e tem tido resultados positivos para os diferentes índices (ZHANG, 2020; YANG, 2021; SAKAMOTO, 2013; LI, 2022). O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é o índice mais utilizado em estudos realizados no Brasil para correlacionar variáveis espectrais com a produtividade do milho. Pesquisas indicam que, este índice apresenta correlações significativas com a produtividade: Bertolin (2017) encontrou coeficiente de determinação (R^2) de 0,81%, com subestimação de apenas 6,32%, enquanto Araújo (2016) também apontou o NDVI como o mais consistente em modelos preditivos, em comparação com NDWI e SAVI. Outros trabalhos corroboram o seu potencial para fins de monitoramento e estimativa de produtividade (CLARINDO, 2022).

No entanto, ainda não há consenso quanto ao estádio fenológico ideal para a captura das imagens. Na cultura do milho, por exemplo, o período que compreende os estágios finais do desenvolvimento vegetativo (VT – pendoamento) até o enchimento de grãos (R3 – grão leitoso) apresenta os melhores resultados. Nessa fase, a planta atinge sua altura máxima e define o número potencial de grãos, coincidindo também com a maior demanda hídrica, em que perdas de até 50% da produtividade podem ocorrer em caso de estresse (BERTOLIN, 2017; ARAÚJO, 2016; LI, 2022). Após esse período, a translocação de nutrientes para os grãos e a redução do teor de clorofila nas folhas diminui a correlação entre os índices vegetativos e a produtividade final.

Outro fator relevante no contexto produtivo regional é a época de semeadura, fortemente condicionada pela cultura de inverno adotada em sistema de rotação. O cultivo de cereais com destino a colheita de grãos, no caso da região, principalmente, o trigo, a cevada ou a aveia branca, geralmente resulta em épocas de semeadura de milho tardias, entre o fim de outubro e início de novembro, o que limita a implantação de segunda safra. Por outro lado, o uso de coberturas ou forrageiras para silagem pré-secada, pode antecipar a semeadura de milho para o final de agosto ou início de setembro, viabilizando a safrinha no mesmo ano agrícola (PARANÁ, 2020).

Diante desse panorama, buscou-se analisar dados de produtividade do milho obtidos em quatro áreas comerciais, ao longo de duas safras agrícolas, em conjunto com imagens temporais do satélite Sentinel-2 para geração do NDVI. O objetivo principal foi avaliar a influência da época de semeadura sobre a correlação entre NDVI e produtividade, bem como compreender o comportamento do índice ao longo do ciclo da cultura. Além disso, buscou-se verificar a eficácia de métodos para estimar o período ideal de aquisição das imagens e analisar a consistência das respostas do NDVI entre talhões submetidos às mesmas condições ambientais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

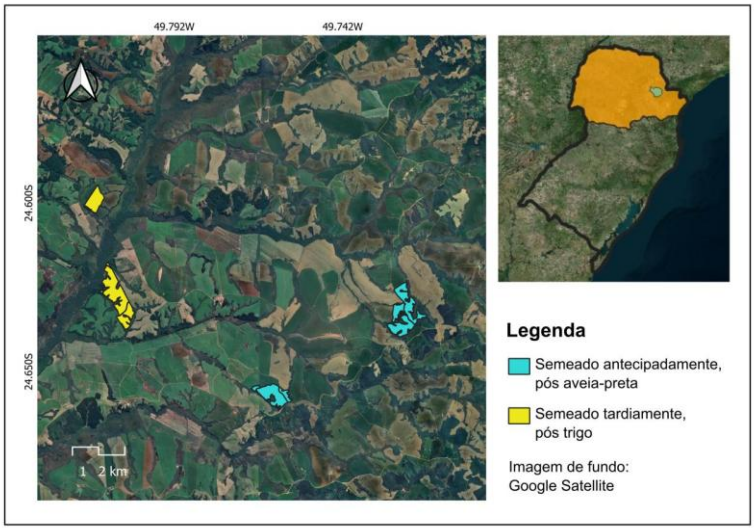
2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido em uma fazenda de produção comercial de grãos, localizada no município de Castro, região dos Campos Gerais, no estado do Paraná. De acordo com a classificação de Köppen, o clima local é do tipo Cfb. A normal climatológica do município indica precipitação média anual de 1.587 mm, com maior concentração nos meses de dezembro e janeiro. Em relação ao regime térmico, a temperatura média anual varia de 16 a 18 ºC, enquanto as médias anuais das temperaturas máximas oscilam entre 23 e 25 ºC (FASOLO, 2002).

Foram selecionados quatro talhões localizados em um raio próximo dentro da mesma fazenda, todos com solos classificados como Latossolo Bruno Ácrico, conforme levantamento pedológico realizado pela Emater e Embrapa (INSTITUTO ÁGUA E TERRA), na escala 1:50.000. Por apresentarem baixa variabilidade espacial, as condições meteorológicas para as semeaduras realizadas em um mesmo período foram consideradas semelhantes.

A área total estudada corresponde a 342 hectares (ha), sendo o talhão I com 70 ha, o talhão II com 116 ha, o talhão III também com 116 ha e o talhão IV com 40 ha. A dimensão expressiva dessas áreas contribui para o aumento do número de pontos amostrais e, consequentemente, para a redução do impacto de possíveis erros pontuais. As áreas foram selecionadas por apresentarem a cultura do milho nas safras de 2022 e 2025, diferenciando-se, entretanto, quanto ao período de semeadura (Figura 1).

Figura 1 - Localização da área utilizada para o estudo



Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

Em dois dos talhões avaliados, o milho foi semeado no período denominado "antecipado", sendo antecedido pela aveia-preta, utilizada exclusivamente como cultura de cobertura, e sucedido por uma segunda safra de feijão. Nos outros dois talhões, o milho foi semeado no período denominado "tardio", com trigo como cultura antecessora. Nesse caso, como a colheita do milho ocorreu entre abril e maio, não houve janela de tempo suficiente para o estabelecimento de uma segunda safra de verão. Essa mesma sequência de rotação de culturas foi adotada em ambos os anos analisados (2022 e 2025), conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Duração do ciclo em cada talhão e período utilizado para a análise de NDVI

Safra	Período de semeadura	Talhão	Data de semeadura	Período de análise	Data de colheita
2021/2022	Antecipado	I	24/08	29/11 - 08/01	31/01
		II	30/08	03/12 - 11/01	04/02
	Tardio	III	26/10	10/02 - 26/03	22/04
		IV	28/10	17/02 - 05/04	04/05
2024/2025	Antecipado	I	11/09	12/12 - 10/01	12/02
		II	17/09	23/12 - 01/02	27/02
	Tardio	III	06/11	14/02 - 28/03	22/04
		IV	02/11	02/02 - 13/03	07/04

Legenda: O período ideal de análise do índice é VT - R3, no estudo aproximado como 60 - 85%, em dias, do ciclo total da cultura.
Fonte: Autores (2025)

2.2 COLETA, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

Os dados de produtividade foram obtidos por meio de sensores instalados em uma colhedora de grãos da marca John Deere®, modelo S760, equipada com receptores GNSS. O principal dispositivo da máquina é o sensor de fluxo de massa, integrado ao sistema *Active Yield*. As informações coletadas foram transferidas automaticamente para a plataforma *Operations Center*, da própria fabricante, que também reúne registros de outras operações agrícolas da fazenda, como semeaduras, pulverizações e colheitas de anos anteriores. Assim, além dos dados de colheita, foi possível acessar informações complementares, como as datas de semeadura.

Após o *download*, os dados foram processados no *software* QGIS®, onde se realizou a transformação para o sistema de coordenadas UTM, a filtragem inicial e a geração dos mapas de colheita. Foram utilizados os valores do campo "VRYIELDMAS", que expressa a produtividade em massa seca já corrigida para umidade, em toneladas por hectare (t/ha). Para eliminar valores atípicos, aplicou-se uma filtragem em duas etapas: (i) exclusão manual de registros acima de 30 t/ha e abaixo de 4 t/ha; (ii) reamostragem pelo *SmartMap*, que promoveu a redução da densidade de pontos, a eliminação de *outliers*, a interpolação por krigagem ordinária e a geração dos mapas de produtividade (PEREIRA et al., 2022). A forma de apresentação escolhida foi a classificação por quartis, a mesma adotada para os mapas de NDVI médio.

ISBN 978-65-990392-6-3

Os dados de NDVI foram obtidos na plataforma *Google Earth Engine* (GEE), a partir de imagens do satélite Sentinel-2. O cálculo do índice foi realizado pela Equação 1:

$$\text{NDVI} = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

Onde: NIR = banda 8, reflectância do infravermelho próximo; Red = banda 4, reflectância do vermelho.

Segundo a literatura, o período mais adequado para análises de correlação com a produtividade situa-se entre o final do estágio vegetativo e a metade do reprodutivo (VT a R3) (BERTOLIN, 2017; ARAÚJO, 2016; LI, 2022). Contudo, como se tratava de uma lavoura comercial, não havia anotações fenológicas detalhadas. Para mitigar essa limitação, definiu-se como período ideal de imageamento o intervalo entre 60% e 85% do ciclo total da cultura, em dias, conforme a Tabela 1. Apesar disso, foram consideradas todas as imagens disponíveis ao longo do ciclo.

Para reduzir interferências externas que poderiam gerar correlações falsas, aplicou-se um filtro visual das imagens. Selecionaram-se manualmente as datas em que as composições RGB não apresentavam nuvens, sombras, aerossóis ou outros ruídos. Essa verificação foi feita individualmente para cada talhão e para cada ano.

De posse dos dados de produtividade e dos índices NDVI, realizou-se a análise de correlação ponto a ponto, comparando as grades de valores de ambos os conjuntos de dados. Para isso, empregou-se o programa computacional R, utilizando o coeficiente de correlação de Pearson a 5% de significância, conforme a Equação 2:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

Onde: x_i = valores da variável X (ex.: produtividade, t/ha); y_i = valores da variável Y (ex.: NDVI); $\bar{x}$ = média de X; $\bar{y}$ = média de Y; n = número de pares de observações (pontos comparados).

Após a seleção das datas sem nebulosidade aparente e o *download* dos respectivos dados de NDVI, foram calculadas as correlações entre cada data e a produtividade. Em seguida, determinados os coeficientes de correlação e os respectivos valores de significância estatística, considerando-se não significativas correlações com p>0,05. Organizou-se uma tabela com todos os valores obtidos e verificou-se que, em algumas datas, as correlações não eram estatisticamente significativas para o teste de Pearson a 5%. Desta forma, foi feita a eliminação dessas datas.

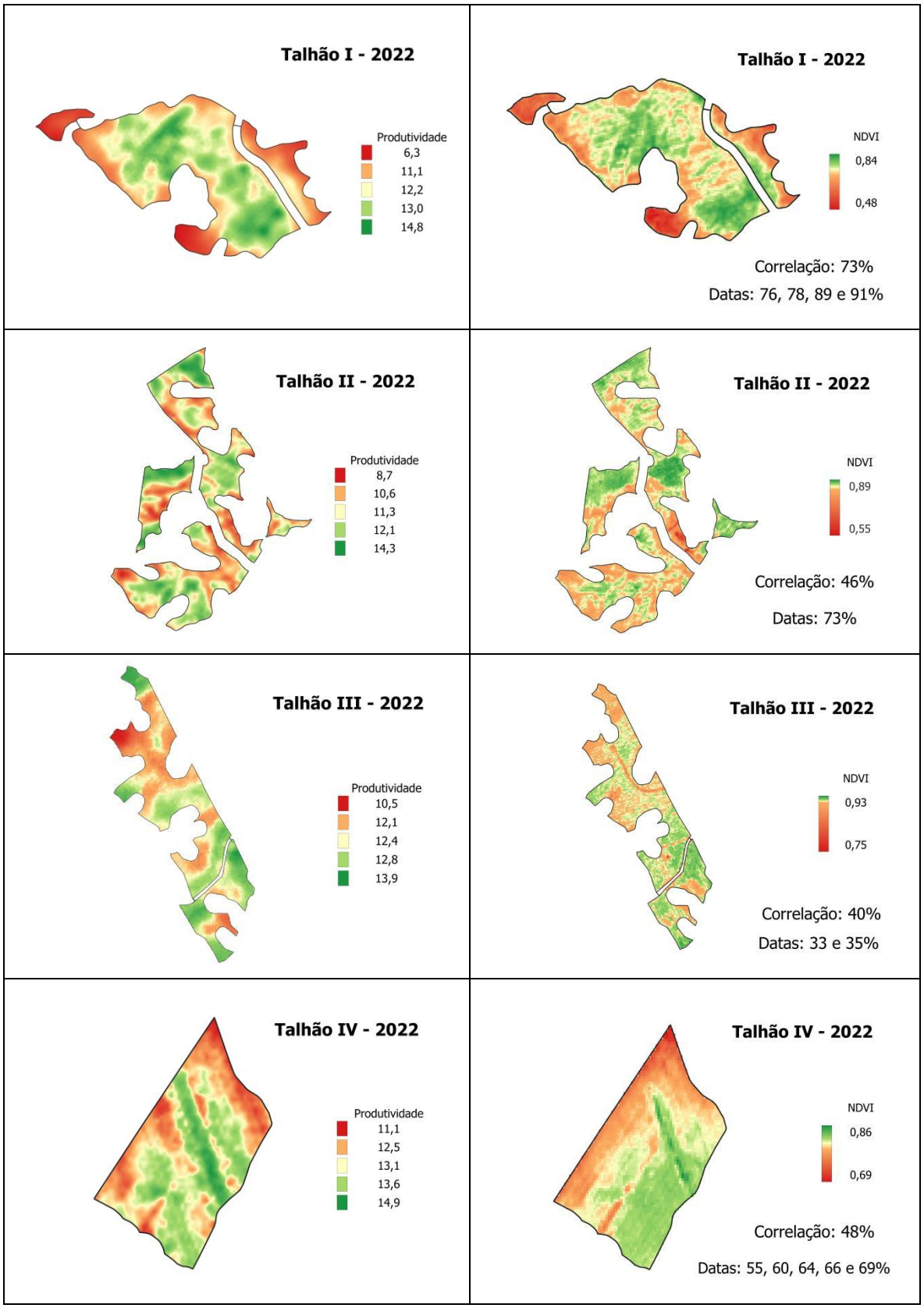
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a filtragem e a reamostragem dos dados de colheita, foram gerados os mapas de produtividade (Figura 2) com base no campo “YRYIELDMAS”, que representa a produtividade de grãos em massa seca (t/ha). Observou-se, contudo, que em alguns mapas, especialmente os de 2022, havia acentuado gradiente de produtividade ao longo das bordaduras dos talhões. Esse efeito pode ser explicado, em parte, pela presença de faixas de eucalipto em torno de alguns talhões até o ano de 2024. Outra hipótese é o ajuste inadequado do sensor da

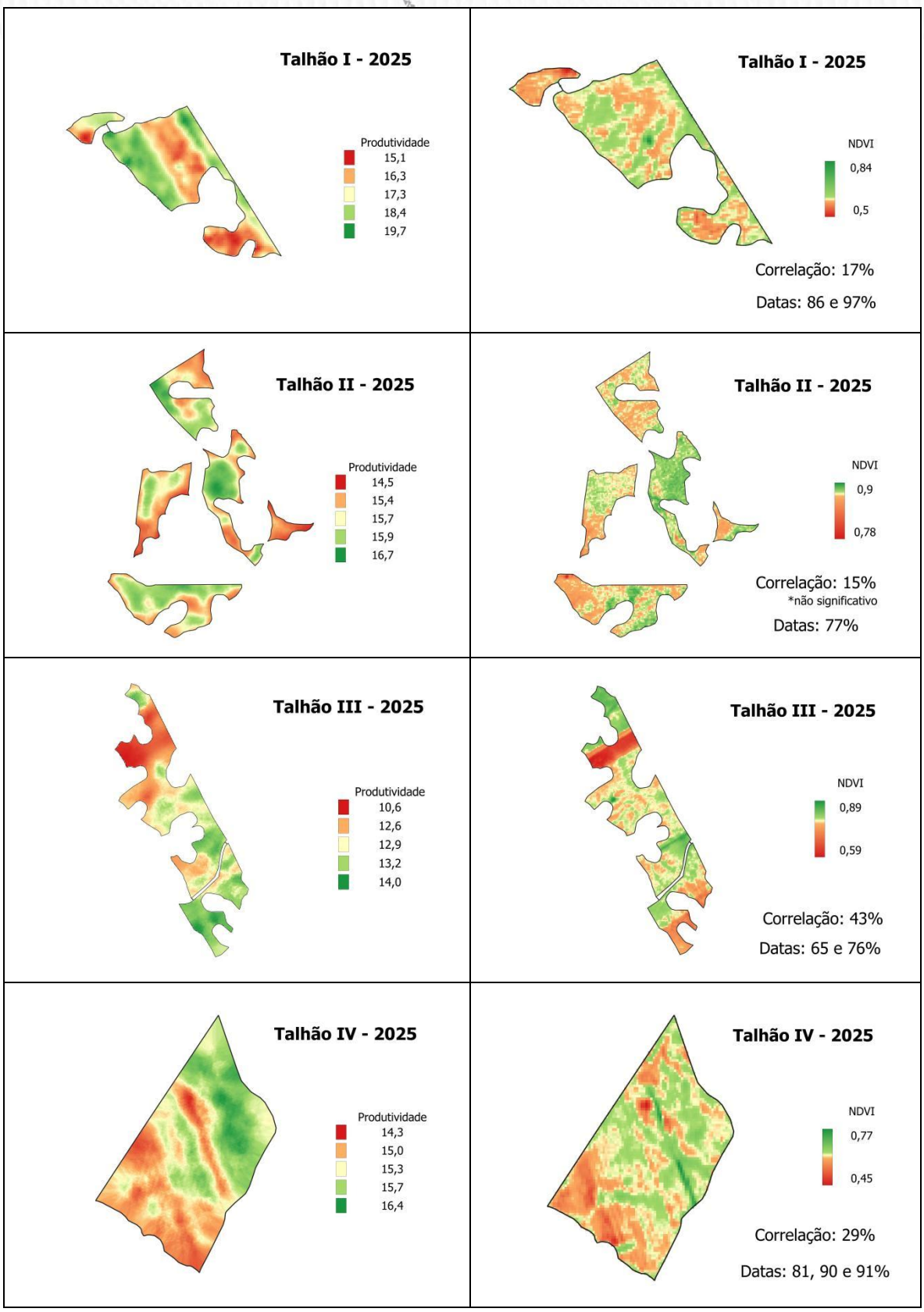
ISBN 978-65-990392-6-3

colhedora nas passadas iniciais, geralmente realizadas nas extremidades do talhão. Para reduzir esse efeito de bordadura, foi aplicado um buffer nas áreas necessárias.

Figura 2 - Mapas de colheita (à esquerda) e Mapas do NDVI médio das melhores imagens (à direita) de cada talhão, para as safras (2022 e 2025)



ISBN 978-65-990392-6-3



Legenda: Valores de produtividade em toneladas por hectares (t/ha);
Datas referentes à porcentagem do ciclo da cultura
Fonte: Autores (2025)

Outro fator observado ocorreu em 2025, quando alguns talhões não receberam o mesmo híbrido em toda a área, principalmente nos talhões I e II. No talhão I, por exemplo,

ISBN 978-65-990392-6-3

metade foi cultivada com um híbrido e a outra metade com outro. Embora ambos fossem classificados como hiper precoces, as imagens de satélite evidenciaram diferenças visuais marcantes na cor da vegetação, refletindo desuniformidade na maturação e, consequentemente, no índice espectral. Para assegurar maior fidedignidade às análises, optou-se por considerar apenas as parcelas cultivadas com o mesmo híbrido, reduzindo significativamente a área útil desses dois talhões na safra 2024/2025. Apesar dessas exclusões, o estudo não foi comprometido, dado o tamanho expressivo das áreas totais analisadas.

Para o talhão II na safra 2024/2025, todas as datas sem nebulosidade resultaram em correlações não significativas. Com o objetivo de permitir a comparação entre os talhões nesta safra, optou-se por manter o valor da máxima correlação deste talhão na tabela consolidada (Tabela 2), mesmo não sendo significativo.

Tabela 2 - Quantidade de datas totais e de datas selecionadas por possuírem maior correlação

Safra	Talhão	Quantidade total de imagens	Quantidade de melhores imagens	Data (% do ciclo) das melhores imagens	Correlação média das melhores imagens
2021/2022	I	17	4	76, 78, 89, 91	73%
	II	8	1	73	46%
	III	6	2	33, 35	40%
	IV	11	5	56, 60, 64, 66, 69	48%
2024/2025	I	3	2	86, 97	17%
	II	0	1	77	15%*
	III	4	2	65, 76	43%
	IV	4	3	81, 90, 91	29%

Legenda: A quantidade total de imagens, se refere aquelas após a filtragem de nebulosidades e correlações não significativas.
As melhores imagens foram as que apresentaram até 5% menor correlação do que a imagem de máxima correlação naquela safra e naquele talhão
*estatisticamente a correlação foi não significativa para o teste Pearson a 5%
Fonte: Autores (2025)

De forma geral, os dados de NDVI apresentaram resultados mais consistentes em 2022. Quando analisadas todas as datas do ciclo, observou-se comportamento espectral compatível com o descrito na literatura para o milho: valores mais baixos nos estágios iniciais e finais e maior resposta entre o final do desenvolvimento vegetativo e o início do reprodutivo (VT – R3). Neste trabalho, adotou-se como métrica de aproximação desse período ideal o intervalo entre 60 e 85% do ciclo da cultura, em dias. Essa abordagem mostrou-se adequada em 75% dos talhões analisados (6 de 8), nos quais a data de maior correlação situou-se neste intervalo, considerando-se a margem de erro de 1%. Verifica-se que esta abordagem está de acordo com outros trabalhos realizados para a cultura e o índice estudado. Aires (2022) e Belmahi et al. (2023) obtiveram resultados satisfatórios de correlação, de 71% e 81%, respectivamente, no período correspondente a 62 a 90% do ciclo total da cultura. Dessa forma, embora promissora, a métrica ainda requer maior calibração.

ISBN 978-65-990392-6-3

Em situações com poucas imagens disponíveis no período ideal, datas fora desse intervalo apresentaram correlações semelhantes às máximas. Por essa razão, não se utilizou exclusivamente o período ideal para a geração dos mapas de NDVI. Optou-se pela média das melhores imagens, definidas como aquelas com correlação até 5% inferior ao valor máximo de cada talhão/safra (Tabela 2). Entre essas imagens selecionadas, apenas 55% pertenceram ao período ideal, resultado mais condizente com a variabilidade observada em condições de campo.

A principal limitação do estudo foi a alta frequência de nebulosidade, que reduziu drasticamente o número de imagens disponíveis. Isso foi crítico na safra 2024/2025, que contou com apenas 11 imagens úteis, contra 42 na safra 2021/2022 (Tabela 2). Os talhões semeados no período antecipado foram os mais afetados, com apenas duas imagens disponíveis após 35% do ciclo. Houve, inclusive, uma janela crítica entre 01/11/2024 e 20/01/2025, sem nenhuma imagem para os quatro talhões estudados, devido à cobertura por nuvens.

Nos talhões III e IV (período tardio), essa mesma janela coincidiu com estágios iniciais, de aproximadamente 49% do ciclo, o que reduziu o impacto. Já nos talhões semeados antecipadamente, a ausência de imagens ocorreu justamente na fase de maior resposta da cultura ao NDVI, resultando em correlações muito baixas e não significativas (17% e 15%). Apesar disso, foram registradas altas produtividades (17,3 e 15,7 t/ha), favorecidas pela elevada pluviosidade neste período (702 mm e 1.386 h de molhamento acumulado), segundo a estação da Fundação ABC.

Essa análise indica que, a data de semeadura não influencia diretamente na correlação NDVI–produtividade, mas pode influenciar indiretamente quando o período de maior resposta da cultura ao índice coincide com fases de elevada nebulosidade, geralmente associadas a picos pluviométricos. Trata-se, portanto, de uma limitação inerente ao sensoriamento remoto orbital óptico, como no caso do Sentinel-2. Outros trabalhos já vêm debatendo esta questão. Neves et al. (2025) destacam que a nebulosidade pode prejudicar a continuidade e a consistência dos dados obtidos por satélites equipados com sensores ópticos. Ademais, a autora menciona a variabilidade dos solos e as práticas agrícolas regionais como possíveis fontes de interferência.

Além disso, observou-se grande variação na quantidade e qualidade de imagens disponíveis mesmo entre talhões com condições semelhantes. Por exemplo, os talhões I e II em 2021/2022 foram semeados com apenas seis dias de diferença, utilizando o mesmo híbrido e apresentando ciclos muito próximos (160 e 158 dias). Apesar disso, o talhão I contou com 17 imagens válidas, enquanto o II apenas 8, devido à presença de nuvens localizadas. De forma análoga, os talhões III e IV nessa safra apresentaram o mesmo número de imagens (4), mas com diferenças qualitativas: as melhores imagens do talhão IV ocorreram entre 56 e 69% do ciclo, como esperado, enquanto no talhão III ocorreram precocemente (entre 33 e 35% do ciclo), resultando em menor correlação (40%).

Na safra 2024/2025, diferenças semelhantes foram registradas. Os talhões I e II, mesmo com apenas seis dias de diferença na semeadura, tiveram colheitas defasadas em 15 dias e médias das melhores imagens em momentos distintos do ciclo (91% e 77%, respectivamente). Fatores como chuvas pontuais, diferenças de solo, manejo ou falhas de aplicação podem explicar essas discrepâncias, somando-se ao impacto das nuvens. Esses resultados evidenciam que, mesmo entre talhões com mesma época de semeadura e condições meteorológicas semelhantes, não há garantia de regularidade nas respostas do NDVI. As lavouras permanecem suscetíveis a múltiplas interferências externas, sendo a nebulosidade uma das mais críticas.

ISBN 978-65-990392-6-3

4 CONCLUSÃO

A época de semeadura do milho não exerce influência direta sobre a correlação entre a produtividade e o índice de vegetação NDVI. Entretanto, pode influenciar de forma indireta quando o período de maior resposta da cultura ao índice coincide com fases de elevada nebulosidade, que frequentemente ocorrem nos meses historicamente mais chuvosos. Esse efeito não é regra: em um mesmo período de semeadura, dois talhões apresentaram resultados contrastantes, com correlação positiva de até 73% em um ano e negativa de apenas 17% em outro, devido à forte interferência da nebulosidade.

No comparativo entre talhões com mesmas datas de semeadura e colheita, híbridos semelhantes, manejos próximos e condições meteorológicas semelhantes, não se observou regularidade no comportamento do índice. Mesmo em áreas próximas, registraram-se diferenças marcantes tanto na quantidade quanto na qualidade das imagens, evidenciando a influência de interferências externas à lavoura, especialmente em períodos com elevada cobertura de nuvens. Assim, embora exista padrão esperado, resultados anormais também podem ocorrer.

A métrica de aproximação do período ideal, compreendido entre o final do estágio vegetativo e a metade do reprodutivo (60 a 85% do ciclo da cultura), que fora utilizada no estudo, mostrou-se adequada para a maioria dos talhões, sobretudo naqueles com maior disponibilidade de imagens ao longo do ciclo. Ainda que sejam necessárias novas calibrações para refinar essa delimitação, qualquer metodologia permanecerá dependente das condições ambientais.

A maior limitação encontrada foi a ocorrência de nuvens, que comprometeu parcial ou totalmente o imageamento em várias datas, configurando-se como um dos principais desafios para o uso do sensoriamento remoto orbital.

Por fim, verificou-se que, as técnicas de sensoriamento remoto baseadas em índices de vegetação apresentam elevado potencial para a gestão agrícola. O NDVI alcançou até 75% de correlação com a produtividade do milho, em análises realizadas mais de um mês antes da colheita.

REFERÊNCIAS

AIRES, N. P. **Relação dos índices de vegetação com a produtividade de milho em áreas irrigadas no Rio Grande do Sul**. 2022. Tese (Mestrado em Agricultura de Precisão) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.

ANDRADE, T. L. de et al. Soybean yield prediction using remote sensing in Southwestern Piauí State, Brazil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 35, n. 1, p. 105–116, jan.–mar. 2022. DOI: 10.1590/1983-21252022v35n111rc. Acesso em: 12 ago. 2025.

ARAUJO, G. L. **Estimativas da evapotranspiração e produtividade do milho irrigado utilizando um modelo multiespectral e imagens do satélite Landsat 8.** 2016. 85 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

BELAHI, M. et al. Analysis of Relationship between Grain Yield and NDVI from MODIS in the Fez-Meknes Region, Morocco. **Remote sensing**, v. 15, n. 11, p. 2707, 2023. DOI: 10.3390/rs15112707.

ISBN 978-65-990392-6-3

BERTOLIN, N. O. et al. Predição da produtividade de milho irrigado com auxílio de imagens de satélite. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 4, 2017. DOI: 10.7127/rbai.v11n400567. Acesso em: 15 ago. 2025.

CLARINDO, W. R. et al. Estimativa da produtividade da cultura do milho safrinha por imagens de satélite Landsat 8. Enciclopédia Biosfera, **Centro Científico Conhecer**, v. 19, n. 40, p. 201–202, 2022. DOI: 10.18677/EnciBio_2022B16. Acesso em: 15 ago. 2025.

FASOLO, P. J. et al. **Caracterização dos solos do Município de Castro, PR**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 9. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 88 p. ISSN 1678-0884.

INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Dados e informações geoespaciais temáticos.** Curitiba, PR: Instituto Água e Terra, 2022. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Dados-e-Informacoes-Geoespaciais-Tematicos. Acesso em: 16 ago. 2025.

LI, F. et al. In-season prediction of corn grain yield through PlanetScope and Sentinel-2 images. **Agronomy**, v. 12, n. 3176, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy12123176. Acesso em: 14 ago. 2025.

NEVES, S. O. et al. Correlação entre a Produtividade do Milho e os Índices de Vegetação Utilizando Imagens do Sentinel 2. **Revista de Gestão e Secretariado - GeSec**, v. 16, n. 4, p. 01-19, 2025. DOI: 10.7769/gesec.v16i4.4811.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto:** princípios e aplicações. 5. ed. São José dos Campos: INPE, 2010.

PARANÁ. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento. **Departamento de Economia Rural – Núcleo Regional Ponta Grossa.** Análise preliminar VBP 2020 – NR Ponta Grossa. Ponta Grossa: SEAB/DERAL, 2020.

PEREIRA et al. Smart-Map: An Open-Source QGIS Plugin for Digital Mapping Using Machine Learning Techniques and Ordinary Kriging, **Agronomy**, v. 12, n.6, p. 1350, 2022. DOI: doi.org/10.3390/agronomy12061350.

SAKAMOTO, T.; GITELSON, A. A.; ARKEBAUER, T. J. MODIS-based corn grain yield estimation model incorporating crop phenology information. **Remote Sensing of Environment**, v. 131, p. 215–231, 2013.

YANG, W. et al. Estimation of corn yield based on hyperspectral imagery and convolutional neural network. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 184, art. 106092, p. 1-11, maio 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106092. Acesso em: 14 ago. 2025.

ZHANG, M. et al. Estimation of maize yield and effects of variable-rate nitrogen application using UAV-based RGB imagery. **Biosystems Engineering**, v. 189, p. 24–35, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.11.001. Acesso em: 14 ago. 2025.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 61

APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS AGROCAD® E T3RRA CUTTA© NA SISTEMATIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE TAIPAS

Application of Digital Technologies AgroCAD® and T3rra Cutta© in the Systematization and Evaluation of Levees

Mônica Noal[1]; André Müllich[1]; Luiz Felipe Silveira Pavão[1]; Ivan C. Maldaner[1]; Marcelo S. Farias[1]; Luciano Z. Pes [1]; Jaqueline Sgarbossa[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria-RS, Brasil, mnoal8439@gmail.com, andre.mullich@hotmail.com, felipepavao14@gmail.com, ivan.maldaner@ufsm.br, marcelo.farias@ufsm.br, lucianopes@politecnico.ufsm.br, sgarbossa.jaqueline@ufsm.br

RESUMO

A sistematização de áreas de arroz irrigado em terras baixas exige planejamento adequado do relevo para garantir eficiência hídrica e operacional. Este trabalho teve como objetivo avaliar a redução no número de taipas após a suavização do terreno com o software T3rra Cutta©, em áreas previamente sistematizadas com o AgroCAD®, nos municípios de Alegrete e Mostardas (RS). O levantamento planialtimétrico foi realizado com GNSS RTK da John Deere, sendo os dados processados no AgroCAD® para geração do Modelo Digital do Terreno (MDT), análise de declividade e traçado das taipas. Posteriormente, o T3rra Cutta© foi utilizado para suavização do MDT, recalculando taipas e volumes de corte e aterro. As áreas apresentaram relevo plano, com declividade inferior a 1% e movimentação média de solo próxima de 230 m³/ha. A suavização resultou em redução significativa no número de taipas, especialmente no talhão de Alegrete (de 99 para 47). Conclui-se que a integração dos softwares favorece maior eficiência no planejamento e melhor aproveitamento operacional.

Palavras-chave: Arroz irrigado; sistematização do solo; taipas.

ABSTRACT

The systematization of lowland areas for irrigated rice requires proper terrain planning to ensure water efficiency and operational performance. This study aimed to evaluate the reduction in the number of levees after terrain smoothing using T3rra Cutta©, in areas previously systematized with AgroCAD®, located in the municipalities of Alegrete and Mostardas, RS, Brazil. A planialtimetric survey was carried out with John Deere GNSS RTK, and the data were processed in AgroCAD® to generate the Digital Terrain Model (DTM), slope analysis, and levee layout. Subsequently, T3rra Cutta© was used for terrain smoothing, recalculating levees and cut-and-fill volumes. The areas presented flat relief, with slopes below 1% and average soil movement close to 230 m³/ha. Terrain smoothing significantly reduced the number of levees, especially in Alegrete field (from 99 to 47). It is concluded that the integration of these tools enhances planning efficiency and improves operational performance.

Keywords: Irrigated rice; land systematization; levees.

1 INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa L.*) é um dos alimentos de maior importância socioeconômica no mundo, constituindo a base alimentar de bilhões de pessoas. É o segundo cereal mais cultivado globalmente, ocupando área aproximada de 161 milhões de hectares, com produção

ISBN 978-65-990392-6-3

anual superior a 756 milhões de toneladas de grãos em casca, o que representa cerca de 29% do total de grãos destinados ao consumo humano (WANDER; SILVA, 2013; FAO, 2022). No Brasil, o cultivo de arroz irrigado está fortemente concentrado no Rio Grande do Sul, estado responsável por aproximadamente 70% da produção nacional. A área cultivada estabilizou-se em torno de um milhão de hectares desde a safra 2004/2005, consolidando a região como referência nacional na orizicultura (SOSBAI, 2022).

No contexto gaúcho, o arroz irrigado é cultivado em 129 municípios da metade sul do estado, onde cerca de 232 mil pessoas dependem direta ou indiretamente dessa atividade. O setor agroindustrial conta com 184 unidades de beneficiamento, processando quase metade do arroz consumido no Brasil (SOSBAI, 2023). Essa relevância produtiva e econômica reforça a necessidade de práticas de manejo eficientes, capazes de aliar sustentabilidade ambiental e competitividade econômica.

As áreas destinadas ao cultivo de arroz irrigado são predominantemente terras baixas, caracterizadas por relevo plano, solos hidromórficos e limitações de drenagem. Nessas condições, a sistematização do solo torna-se prática indispensável, pois viabiliza o adequado manejo da lâmina de água. O processo envolve abertura de canais de irrigação e drenagem, construção de estradas internas, nivelamento da superfície e execução de taipas, além de estruturas complementares quando necessárias (SILVA et al., 2008; EMBRAPA, 2023). As taipas, dispostas em curvas de nível, têm como função compartimentar a área em quadros, permitindo a irrigação por inundação contínua e garantindo eficiência hídrica no sistema produtivo.

Historicamente, a sistematização era realizada com base em métodos empíricos e instrumentos simples, como nível de mangueira, cavaletes ou laser, evoluindo para maior mecanização com entaipadeiras de base estreita e larga (CONAB, 2015). Contudo, nas últimas décadas, o avanço da Agricultura de Precisão transformou essa prática. O uso de receptores GNSS de alta acurácia e sistemas de correção em tempo real, como o RTK (*Real Time Kinematic*), permitiu maior precisão no levantamento topográfico, reduzindo erros e otimizando a execução de projetos de nivelamento (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015; JOHN DEERE, 2025).

Entre as ferramentas digitais disponíveis, destacam-se o AgroCAD® e o T3rra Cutta©. O primeiro possibilita a geração do Modelo Digital de Terreno (MDT), análise de declividade e traçado inicial de taipas, representando um importante recurso para planejamento agrícola (TECGRAF, 2020). Já o T3rra Cutta© agrega funções avançadas, como a suavização do relevo e o cálculo automatizado de corte e aterro, além da otimização das linhas de taipas com menor movimentação de solo (T3RRA, 2025). A integração dessas ferramentas permite elaborar projetos mais realistas e ajustados à realidade do campo, contribuindo para maior eficiência operacional e redução de custos.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o impacto da suavização digital do terreno na configuração de taipas em áreas destinadas ao cultivo de arroz irrigado em terras baixas do Rio Grande do Sul. Para isso, foram utilizados os softwares AgroCAD® e T3rra Cutta©, que possibilitaram a geração e análise de Modelos Digitais de Terreno (MDT), o traçado inicial das taipas e a posterior suavização do relevo. A comparação entre as duas ferramentas permitiu identificar diferenças no número de estruturas geradas, no volume de solo movimentado e na eficiência do planejamento topográfico. Dessa forma, buscou-se compreender de que maneira o uso combinado dessas tecnologias de Agricultura de Precisão pode contribuir para otimizar a sistematização do solo, melhorar o manejo da água e favorecer a eficiência operacional em lavouras orizícolas.

ISBN 978-65-990392-6-3

2 MATERIAIS E MÉTODOS

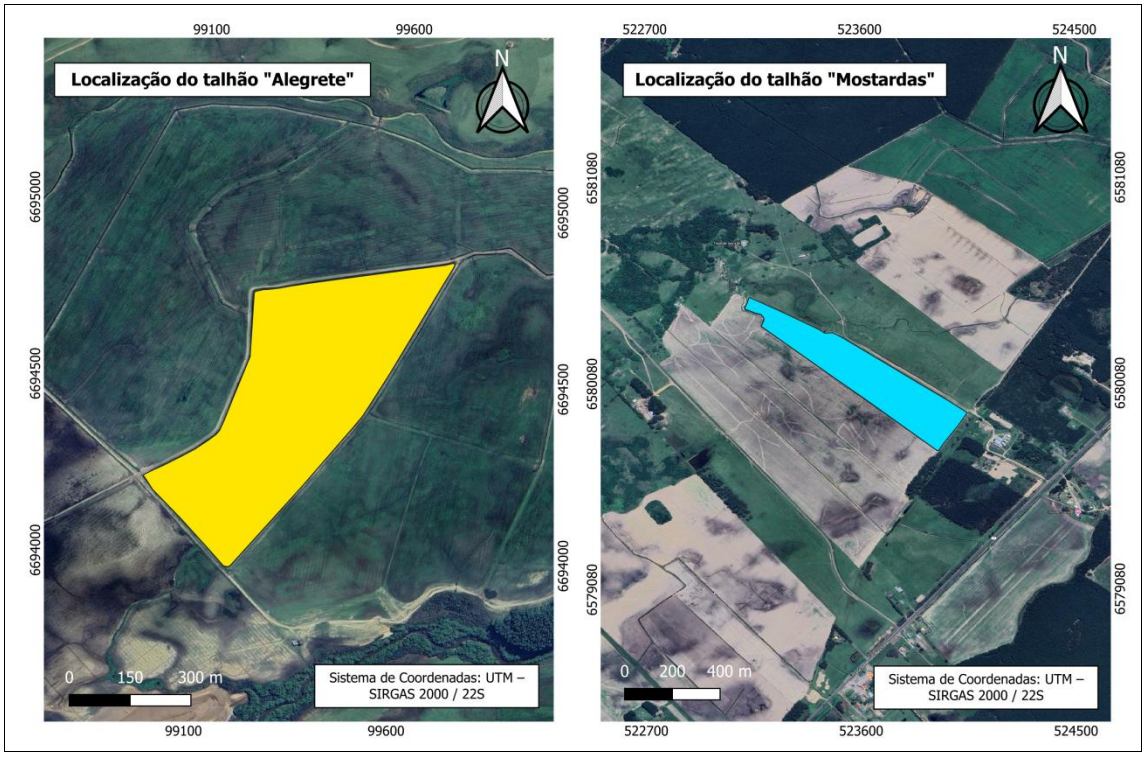
2.1 Área de estudo

O projeto de sistematização, desenvolvido com o uso dos softwares AgroCAD® e T3rra Cutta©, foi conduzido em duas áreas orizícolas do estado do Rio Grande do Sul, selecionadas por apresentarem características distintas de relevo e declividade.

A primeira área, denominada talhão Alegrete, está localizada no município de Alegrete, região da Campanha Gaúcha, com coordenadas centrais em 29°49'04.6" S e 55°09'14.1" W. A propriedade é destinada ao cultivo de arroz e soja. O relevo é suavemente ondulado, típico da Campanha, e os solos predominantes são Planossolos, que possuem boa capacidade de retenção de água, mas exigem sistematização para evitar acúmulo excessivo em áreas mais baixas. O clima regional é subtropical úmido, com precipitações bem distribuídas ao longo do ano, favorecendo o cultivo de arroz irrigado por inundação. O talhão apresenta área de 26,2 hectares (Figura 1).

A segunda área, denominada talhão Mostardas, situa-se no município de Mostardas, na região do Litoral Sul do estado, com coordenadas centrais em 30°55'10.3" S e 50°45'20.9" W. A propriedade está inserida na planície costeira, caracterizada por relevo plano e presença de Gleissolos, que favorecem o cultivo de arroz irrigado. A região apresenta elevada disponibilidade hídrica e baixa variação altimétrica, o que garante alta eficiência à irrigação por inundação. O talhão avaliado possui área de 17,8 hectares (Figura 1).

Figura 1. Localização e identificação dos talhões de estudo.



Fonte: Autores (2025)

2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados

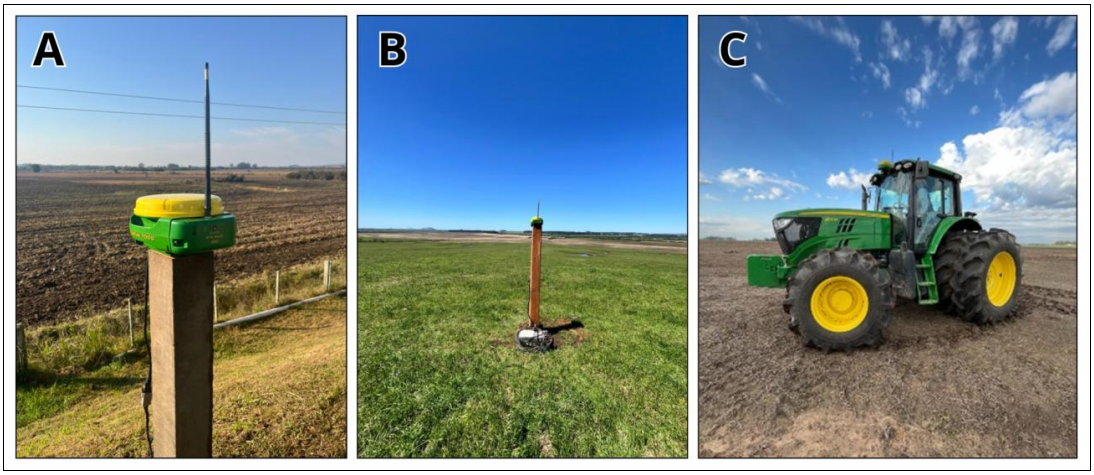
O levantamento planialtimétrico das áreas de estudo foi realizado com o uso de sistema GNSS RTK (*Real Time Kinematic*) da marca John Deere, operando em base absoluta. Para garantir elevada precisão vertical, a base RTK permaneceu ativa por 24 horas, realizando

ISBN 978-65-990392-6-3

autocalibração e ajustando sua posição com base em dados de satélites. O equipamento era composto por receptores StarFire 6000 e 7000 e rádio RTK na frequência de 450 MHz (Figuras 2A e B), permitindo a transmissão de correções em tempo real para o rover durante o mapeamento. O mapeamento foi realizado com trator agrícola equipado com receptor GNSS, também denominado rover (Figura 2C), escolha justificada pela disponibilidade operacional e pela facilidade de deslocamento em áreas cultivadas. Ressalta-se que o sistema de correção diferencial da John Deere é suportado por uma rede de cinco bases fixas georreferenciadas na América do Sul, localizadas em Catalão (GO), Sapezal (MT), Horizontina (RS), Luís Eduardo Magalhães (BA) e Rosário (ARG) (BRUTTI, 2014).

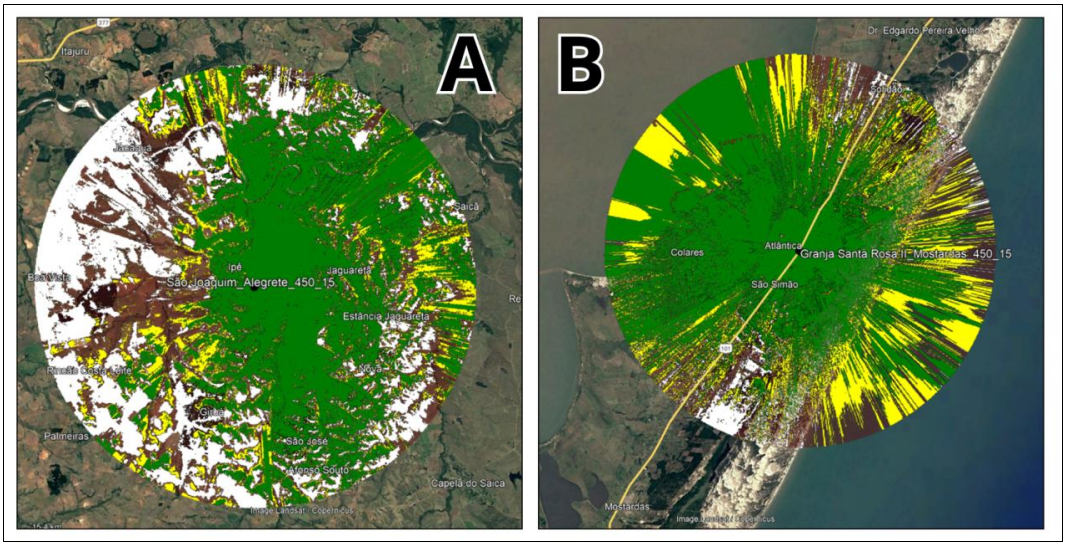
O alcance máximo da base foi de aproximadamente 19 km. A intensidade do sinal foi representada por cores: verde para cobertura ótima, amarelo para instável e branco para áreas sem recepção, variação associada principalmente ao relevo regional (Figura 3).

Figura 2. Bases RTK e trator utilizado no levantamento planialtimétrico.



Fonte: Autores (2025)

Figura 3. Cobertura de sinal da base RTK instaladas em Alegrete (A) e Mostradas (B).



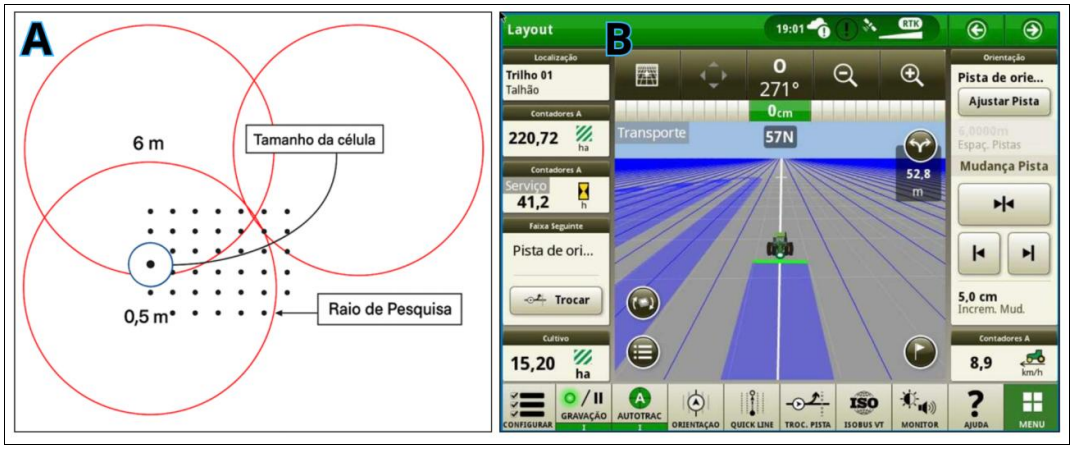
Fonte: Autores (2025)

A Figura 4 ilustra a malha de coleta de pontos obtida no levantamento planialtimétrico. As passadas do trator (rover) foram realizadas a cada 6 m, enquanto os pontos altimétricos foram registrados automaticamente a cada 0,5 m pelo monitor Geração 4 da John Deere. Esse arranjo resulta em elevada densidade de pontos, garantindo precisão na geração do Modelo

ISBN 978-65-990392-6-3

Digital de Terreno (MDT). Os círculos em vermelho representam o raio de pesquisa adotado no processamento, enquanto a célula destacada exemplifica a área de interpolação entre pontos vizinhos, fundamental para a suavização e modelagem da superfície. A velocidade de deslocamento manteve-se entre 10 e 12 km h^{-1}, faixa considerada adequada para precisão e estabilidade do sinal.

Figura 4. Malha da coleta de pontos (A) e visão geral monitor Geração 4 realizando mapeamento (B).

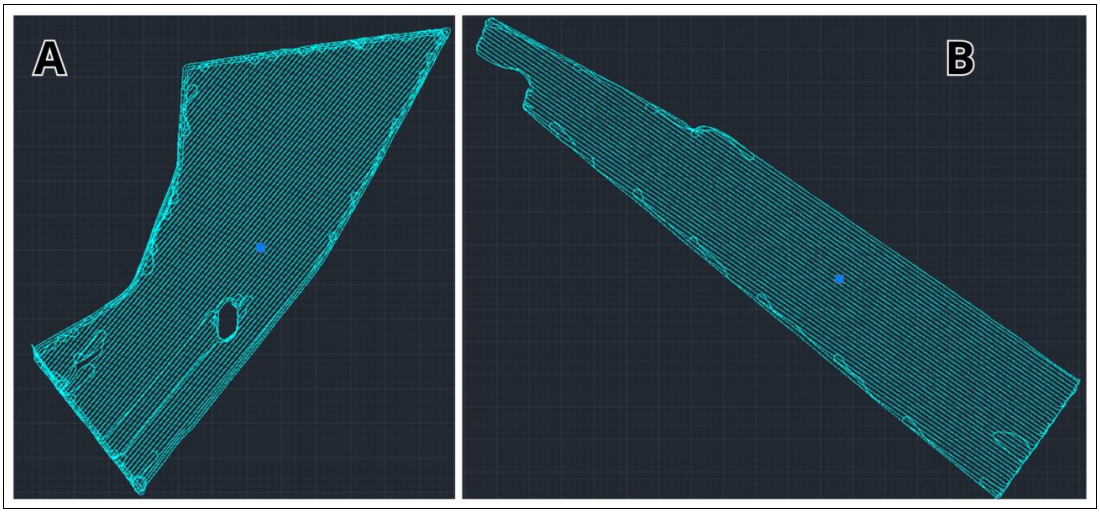


Fonte: Autores (2025)

No talhão Mostardas, a coleta de dados topográficos ocorreu em 26 de agosto de 2024, seguida da execução das taipas em 7 de setembro de 2024, com intervalo aproximado de 12 dias entre o levantamento e a intervenção em campo. Já no talhão Alegrete, o levantamento foi realizado em 30 de outubro de 2024, e as taipas executadas em 1º de novembro de 2024, com intervalo operacional reduzido de apenas dois dias.

Ao término do mapeamento, os dados foram enviados automaticamente por meio do sistema de telemetria embarcado JDLink, que permitiu a transferência remota para o *Operations Center*, eliminando a necessidade de extração manual via dispositivo USB. Os arquivos, recebidos no formato JD-Data, foram posteriormente importados para o AgroCAD® para processamento. Após a importação, foram realizadas verificações dos dados brutos (Figura 5) quanto à qualidade do sinal e à velocidade de mapeamento, assegurando que os dados representassem com precisão as condições reais do terreno.

Figura 5. Levantamento planialtimétrico do talhão Alegrete (A) e Mostardas (B).

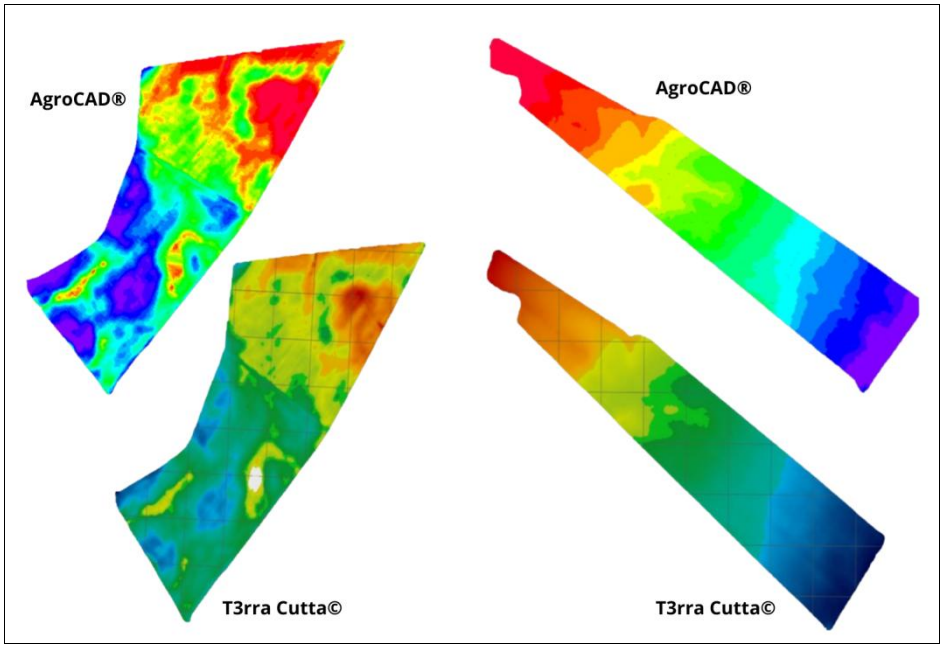


Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

Em seguida, processou-se a malha de pontos para a geração dos Modelos Digitais de Terreno (MDT) nos *softwares* AgroCAD® e T3rra Cutta©, possibilitando análise comparativa da topografia. Observou-se na figura 6 que o MDT gerado no AgroCAD® apresentou maior contraste na escala de cores, destacando variações sutis do relevo, enquanto o T3rra Cutta© produziu representação mais suavizada, ainda evidenciando diferenças altimétricas relevantes. Essas variações refletem o modo de processamento de cada plataforma e podem influenciar na interpretação visual e no planejamento operacional.

Figura 6. MDT dos talhões gerados pelos *softwares* AgroCAD® e T3rra Cutta©.



Fonte: Autores (2025)

A partir dos MDTs e das linhas de nível, foram projetadas as taipas, considerando diferença de nível entre pontos de 6 a 7 cm, valor adequado para garantir o manejo da lâmina de água nas áreas sistematizadas.

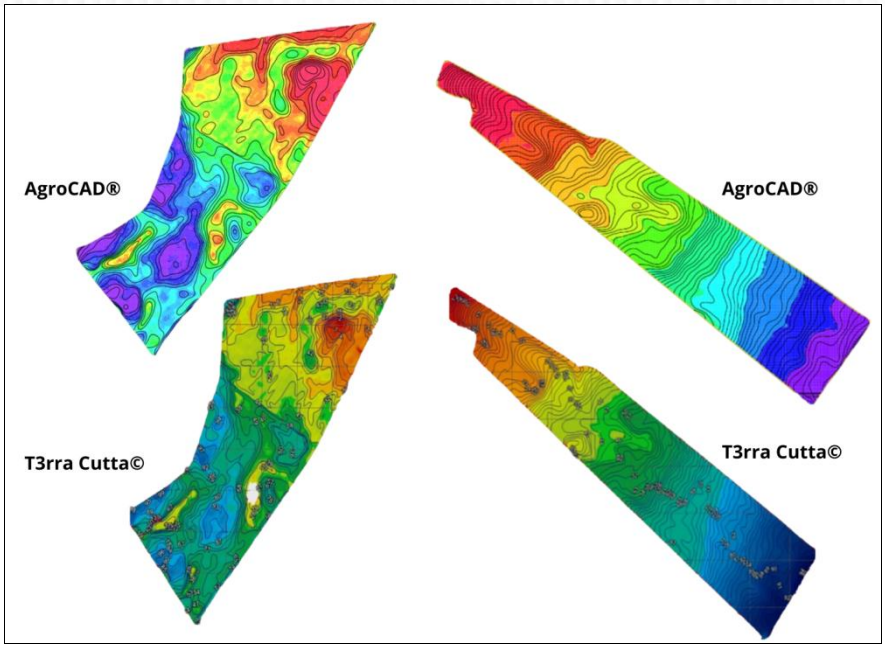
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figuras 7 apresentam os projetos de taipas desenvolvidos nos softwares AgroCAD® e T3rra Cutta©. As diferenças observadas nas curvas de nível e nas áreas demarcadas refletem os critérios específicos de cada plataforma.

Ao comparar o número de taipas geradas em cada *software*, verificou-se uma diferença relativamente pequena antes da suavização do terreno. No talhão Mostardas, o AgroCAD® resultou em 98 taipas, enquanto o T3rra Cutta© gerou 95 taipas. Já no talhão Alegrete, o AgroCAD® indicou 105 taipas, contra 99 obtidas pelo T3rra Cutta©. Essa diferença pode ser explicada pelo algoritmo de suavização utilizado pelo T3rra Cutta©, que tende a simplificar segmentos, resultando em menor número de linhas, enquanto o AgroCAD® gera traçados mais detalhados. Esse contraste evidencia que a análise deve considerar não apenas a quantidade de taipas, mas também a qualidade e a aplicabilidade dos traçados no campo.

ISBN 978-65-990392-6-3

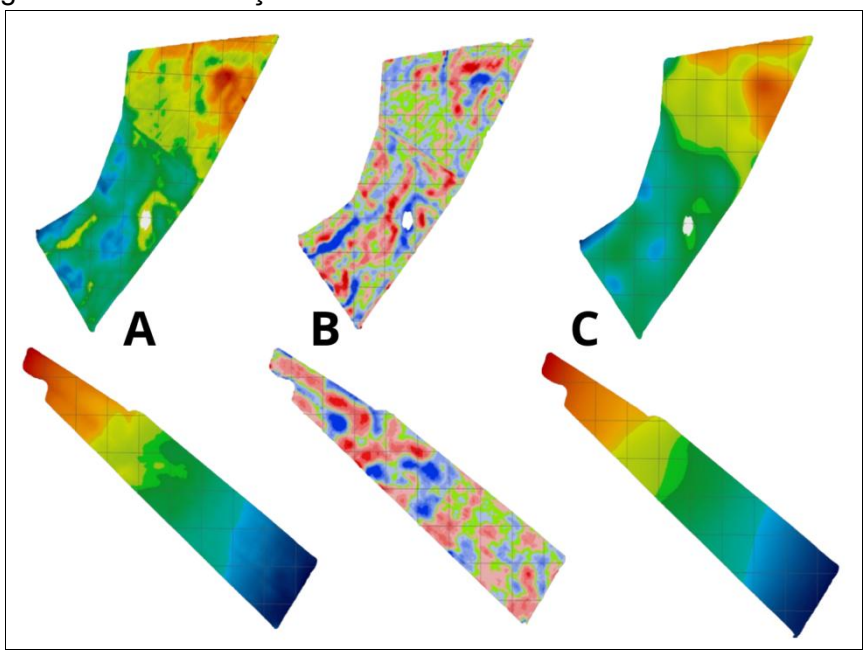
Figura 7. Projeto de Taipas desenvolvidos pelos *sofwares* AgroCAD® e T3rra Cutta©.



Fonte: Autores (2025)

A Figura 8 ilustra o processo de sistematização do terreno em ambas as áreas. Nos MDTs originais (8A), observa-se maior variação altimétrica, com presença de desníveis que demandam intervenções significativas para o nivelamento. Os mapas de corte e aterro (8B) evidenciam a necessidade de movimentação de solo, com zonas de acúmulo e retirada distribuídas de forma intensa. Após a suavização (8C), nota-se maior uniformidade da superfície, com redução de ondulações e pequenas irregularidades do relevo.

Figura 8. Sistematização do terreno através do *software* T3rra Cutta©.



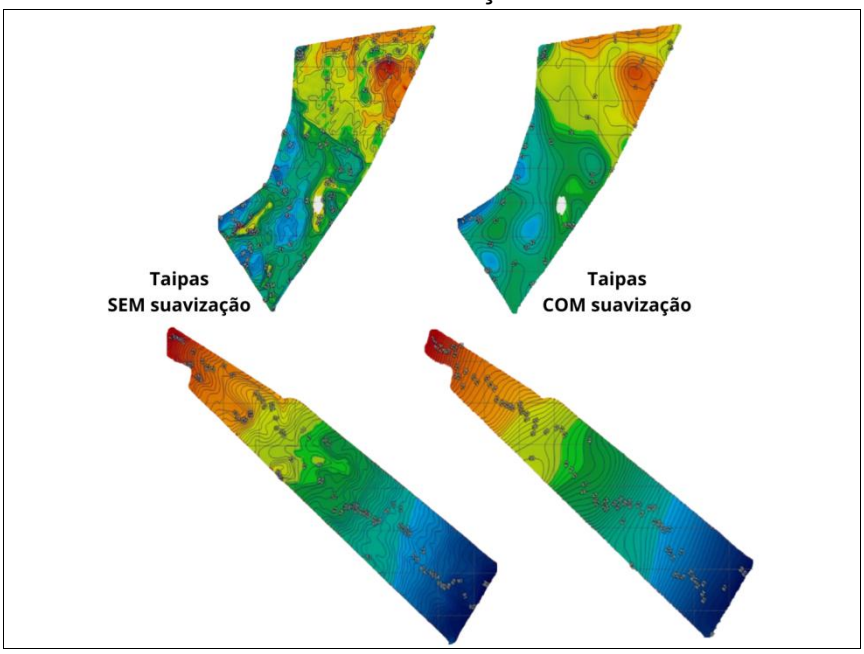
Fonte: Autores (2025)

Esse processo impactou diretamente no número de taipas projetadas, como mostra a Figura 9. No talhão Mostardas, o número de taipas diminuiu de 95 para 89 após a suavização. No talhão Alegrete, a redução foi ainda mais expressiva, passando de 99 para 47 taipas. Esses

ISBN 978-65-990392-6-3

resultados demonstram que a suavização digital do terreno pode otimizar o traçado, favorecer o escoamento da água e facilitar as operações mecanizadas, especialmente em áreas com menor variação de relevo residual.

Figura 9. Comparação dos talhões antes e depois da suavização das taipas após sistematização



Fonte: Autores (2025)

A média de solo movimentado por hectare foi semelhante entre os talhões, sendo de 227,8 m³ ha⁻¹ em Mostardas e 231,1 m³ ha⁻¹ em Alegrete. Isso indica que, apesar da redução no número de taipas, a intensidade de corte e aterro manteve-se praticamente equivalente. Atualmente, não existe um limite padrão para a movimentação de solo em projetos de sistematização, essa variável depende de fatores como relevo, extensão da área, forma do terreno e objetivos específicos do projeto. Estudos recentes, como o de Parfitt et al. (2023), têm discutido práticas de suavização em terras baixas como estratégia para reduzir o número de taipas e melhorar a eficiência operacional.

Tabela 6- Resultado obtido dos dados processados no *software* AgroCAD® e T3rra Cutta©

Etapa	Talhão Mostardas	Talhão Alegrete
Número de Taipas software AgroCAD®	98	105
Número de Taipas software T3rra Cutta©	95	99
Número de taipas pós suavização no software T3rra Cutta©	89	47

Fonte: Autores (2025)

O AgroCAD® mostrou-se eficiente para a geração do MDT, análise de declividade e traçado inicial das taipas, possibilitando ajustes básicos das linhas. No entanto, não realiza a

ISBN 978-65-990392-6-3

suavização do MDT nem cálculos automáticos de corte e aterro, restringindo-se ao planejamento inicial. Já o T3rra Cutta© se destacou por integrar funções de suavização do relevo, otimização das taipas e cálculo de volumes de corte e aterro em um único ambiente. A utilização conjunta das ferramentas proporcionou uma visão mais completa, unindo análise topográfica detalhada a estimativas operacionais aplicáveis à prática agrícola.

4 CONCLUSÃO

A sistematização de áreas agrícolas com o uso de ferramentas digitais de Agricultura de Precisão mostrou-se eficiente na redução do número de taipas e no aprimoramento do planejamento em terras baixas. A análise comparativa evidenciou reduções distintas entre as áreas avaliadas: no talhão Mostardas, houve redução de 95 para 89 taipas, enquanto no talhão Alegrete a redução foi expressiva, de 99 para 47, demonstrando o impacto da suavização digital do terreno na otimização do traçado.

As análises de declividade confirmaram que ambas as áreas apresentam relevo predominantemente plano, com valores médios inferiores a 1%, condição considerada ideal para a irrigação por inundação. A movimentação média de solo foi semelhante entre os talhões (cerca de 230 $m^3\ ha^{-1}$), o que reforça que a suavização atua sobretudo na configuração dos traçados, sem aumentar significativamente o volume de corte e aterro.

O uso integrado de AgroCAD® e T3rra Cutta© mostrou-se complementar: enquanto o primeiro possibilita a análise detalhada da topografia e o planejamento inicial das taipas, o segundo agrega funções de suavização do relevo, cálculo automatizado de volumes de corte/aterro e simulações aplicadas ao manejo hídrico. Além disso, esses *softwares* favorecem a visualização do relevo, a geração de mapas intuitivos e a integração com máquinas agrícolas, assegurando maior eficiência operacional.

Conclui-se que a adoção dessas tecnologias representa um avanço significativo para a orizicultura gaúcha, contribuindo para reduzir custos, otimizar o manejo da água e ampliar a sustentabilidade das operações em áreas de terras baixas.

REFERÊNCIAS

BRUTTI, Marcelino André. **Utilização do sistema John Deere-Surface Water PRO e CR-Campeiro 7 para obtenção de dados altimétricos para o manejo do arroz irrigado (Oryza sativa)**. 2014. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **A cultura do arroz**. Organização: Aroldo Antonio de Oliveira Neto. Brasília: Conab, 2015. 180 p. Disponível em: http://www.conab.gov.br. Acesso em: 29 maio 2025.

DUCHAUFOUR, P. **Pedology**: pedogenesis and classification. Translated by T. R. Paton. London: Allen & Unwin, 1982.

EMBRAPA. **Sistema de cultivo**. Agência de Informação Tecnológica. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/producao/sistema-de-cultivo. Acesso em: 29 maio 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Métodos de irrigação**. In: Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Cultivos > Arroz > Pré-produção. 2023. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/pre-producao/metodos-de-irrigacao. Acesso em: 31 maio 2025.

JENSEN, John R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.

JOHN DEERE. **Base RTK**. Disponível em: https://www.deere.com.br/pt/agricultura-de-precis%C3%A3o/receptores-monitores-e-rtk/base-rtk/. Acesso em: 10 abr. 2025.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R. do; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

PARFITT, José Maria Barbat et al. **Modelos para sistematização nas terras baixas do Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2020. 22 p. (Documentos / Embrapa Clima Temperado, 489).

PARFITT, José Maria Barbat; SCIVITTARO, Walkyria Bueno; ANDRES, André; CONCENÇO, Germani; ARAUJO, Letícia Burkert Méllo; MARTIN, Jéssica Goetzke. **Sistema sulco-camalhão em área suavizada para o cultivo de espécies de sequeiro em terras baixas**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2023. 14 p. (Circular Técnica, 245). ISSN 1981-5999.

SILVA, L. S. da; MAGALHÃES JÚNIOR, P. C.; MARCHEZAN, E.; MAGALHÃES, P. S. G. **Planejamento e execução de obras de sistematização de áreas agrícolas para irrigação do arroz**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2008. 35 p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 287).

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL – SENAR. **Agricultura de precisão: conceitos**. Brasília: SENAR, 2019. 28 p. (Coleção SENAR, 244).

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO – SOSBAI. **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. 33. ed. Restinga Seca, RS: SOSBAI; Epagri; Embrapa; Irga; UFPel; UFRGS; UFSM, 2023. 200 p.

STONE, Luís Fernando. **Eficiência do uso da água na cultura do arroz irrigado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2005. 48 p. (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, n. 176). ISSN 1678-9644.

TECGRAF. **AgroCAD®**: software de gestão agrícola. Porto Alegre: Tecgraf, 2020.
T3RRA. *Software – T3rra.* Disponível em: https://t3rra.com/software/. Acesso em: 1 jun. 2025.

WANDER, Alcindo Elenor. **A cultura**. In: BORÉM, Aluizio; RANGEL, Paulo Hideo N. (org.). *Arroz: do plantio à colheita.* 1. ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2015. p. 14.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 62

COMPARAÇÃO ENTRE PROJETOS DE LINHAS PARA A OPERAÇÃO DE SEMEADURA EM UM TALHÃO AGRÍCOLA

Comparison between row designs for the seeding operation in an agricultural field

Guilherme Bortolotto da Silva[1]; Vitor Cargnin Pegoraro[1]; Luiz Felipe Silveira Pavão[1]; André Müllich[1]; Ivan Carlos Maldaner[1]; Marcelo Silveira de Farias[1]; Luciano Zucuni Pes[1]; Jaqueline Sgarbossa[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria - RS, Brasil, guilhermebortolottodasilva@gmail.com, vitorcpegoraro@gmail.com, felipepavao14@gmail.com, andre.mullich@hotmail.com, ivan.maldaner@ufsm.br, marcelo.farias@ufsm.br, lucianopes@politecnico.ufsm.br, sgarbossa.jaqueline@ufsm.br

RESUMO

A semeadura é uma das operações mais importantes para a agricultura, e a definição do trajeto percorrido pelo conjunto mecanizado nessa etapa pode afetar tanto a conservação do solo quanto o comprimento total percorrido. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do uso de diferentes projetos de linhas de semeadura sobre a declividade longitudinal das linhas e sobre a distância total percorrida pelo conjunto mecanizado durante a operação. Foram elaborados cinco projetos de linhas de semeadura com o auxílio do *software* AgroCad, simulando a operação em linhas retas do tipo “AB” ou acompanhando uma, duas ou três curvas de nível mestras do terreno. Os resultados evidenciam que o uso de projetos de linhas considerando as curvas de nível do terreno garantiu a predominância de menor declividade longitudinal das linhas de semeadura. Além disso, quanto maior o número de curvas de nível mestras utilizadas, menor é a declividade longitudinal das linhas de semeadura e maior é a distância total percorrida pelo conjunto mecanizado para realizar a operação.

Palavras-chave: Semeadura. Projetos de linhas. Conservação do solo.

ABSTRACT

Seeding is one of the most important operations in agriculture, and the definition of the path traveled by the mechanized set at this stage can affect both soil conservation and the total distance covered. In this context, the objective of this study was to evaluate the effect of different seeding line designs on the longitudinal slope of the rows and on the total distance traveled by the mechanized set during the operation. Five seeding line projects were developed with the aid of the AgroCad software, simulating the operation in straight 'AB' lines or following one, two, or three master contour lines of the terrain. The results show that the use of line designs considering the contour lines of the terrain ensured a predominance of lower longitudinal slopes of the seeding rows. Furthermore, the greater the number of master contour lines used, the lower the longitudinal slope of the seeding rows and the greater the total distance traveled by the mechanized set to perform the operation.

Keywords: Seeding operation. Row designs. Soil conservation.

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque/RS · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

A Organização das Nações Unidas (ONU BRASIL, 2019) projeta que, até o ano de 2050, a população mundial irá atingir 10 bilhões de pessoas. Esse significativo aumento populacional exigirá o incremento na produção agrícola para suprir a demanda global por alimentos. Por mais que seja imprescindível unir alta produtividade no campo com a preservação do ambiente, nos últimos anos a ação antropogênica tem aumentado a velocidade do processo natural de mudanças climáticas, geológicas e biológicas (BELGRANO et al., 2023). Neste contexto, considerando as práticas realizadas na agricultura para produzir alimentos, é importante a adoção de estratégias que preservem os recursos naturais de produção, incluindo o solo.

No contexto agrícola atual, o cultivo de áreas significativas e a obtenção de altas produtividades requer o uso de máquinas agrícolas para realizar as diferentes operações, como a semeadura (VIAN et al., 2013). A semeadura é considerada uma das etapas mais importantes dentro do processo de produção agrícola, pois é a partir dela que são estabelecidas as plantas, responsáveis pela formação do produto final.

Na semeadura da cultura da soja, o trajeto percorrido pelo conjunto mecanizado durante a operação pode influenciar a suscetibilidade à ocorrência de erosões no solo, especialmente quando a semeadora-adubadora utilizada possui hastes sulcadoras para a deposição do adubo e o sentido da operação segue a tendência “a descer” ou “a subir” no terreno do talhão. Neste caso, pode ocorrer a formação de erosões no local de passagem do mecanismo sulcador da semeadora, devido ao escoamento superficial das águas pluviais.

Para evitar ou minimizar a ocorrência de erosões no solo, uma opção disponível com os avanços na área da Agricultura de Precisão e Digital é a realização da semeadura considerando as curvas de nível do terreno, conhecida como semeadura em nível, ou semeadura em contorno. Essa ferramenta é utilizada a partir de projetos de linhas elaborados com softwares específicos, e consiste na seleção de uma ou mais curvas de nível do terreno, denominadas mestras, que são replicadas como referências ao longo do talhão.

A curva de nível mestra em um projeto de linhas de semeadura em nível é a primeira linha-guia, traçada em um nível topográfico constante. Essa linha serve como referência principal para a semeadura de todas as outras, que serão paralelas a ela. O objetivo da curva mestra é garantir que a semeadura siga o contorno natural do terreno.

A partir da definição do projeto de semeadura seguindo as curvas de nível, as fileiras de cultivo são dispostas transversalmente à inclinação do terreno, evitando o sentido vertical da encosta. Essa técnica visa diminuir a erosão hídrica, incrementar a infiltração da água e promover maior uniformidade no aproveitamento dos nutrientes do solo (PENSAMENTO VERDE, 2014).

Quando há disponibilidade de piloto automático no trator e não são seguidas as curvas de nível do terreno para o planejamento da operação de semeadura, normalmente é utilizada a configuração de linhas retas do tipo “AB”. Essa metodologia garante que o conjunto mecanizado mantenha o percurso em linhas retas na lavoura, com menos sobreposição e aumento da eficiência operacional (FSG INOVAÇÃO AGRÍCOLA, 2025). No entanto, ela desconsidera a declividade do terreno, fazendo com que em muitas regiões dos talhões, o percurso seja realizado “a descer” ou “a subir”, favorecendo a ocorrência de erosões durante as chuvas.

Sabe-se que, quanto menor for a declividade longitudinal das linhas de semeadura, menor é o risco da ocorrência de erosões no solo, o que evidencia a importância do uso de estratégias que minimizem trajetos “a descer” ou “a subir” durante a operação de semeadura. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do uso de diferentes projetos de

ISBN 978-65-990392-6-3

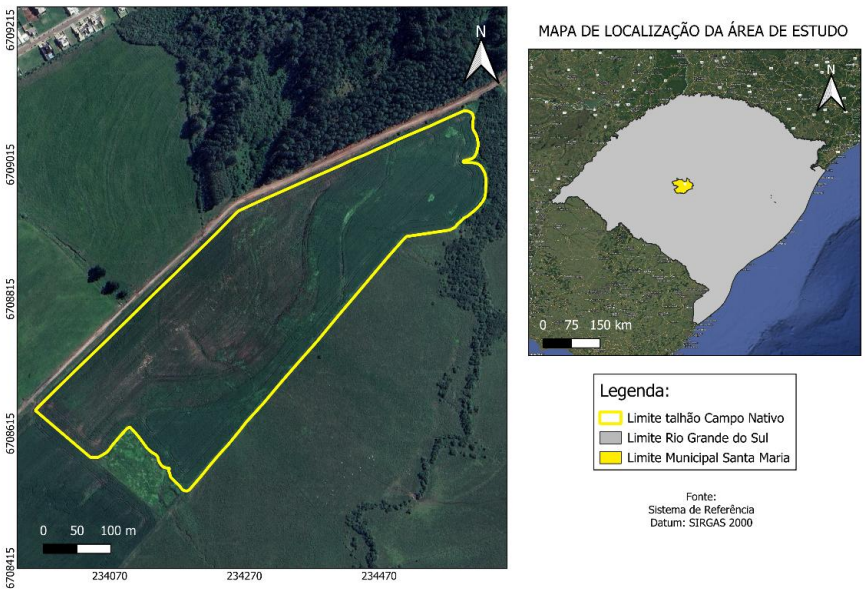
linhas de semeadura sobre a declividade longitudinal das linhas e sobre a distância total percorrida pelo conjunto mecanizado durante a operação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na Área Agropecuária do Colégio Politécnico, da Universidade Federal de Santa Maria, na cidade de Santa Maria, RS. Conforme a classificação Köppen, a região possui clima subtropical úmido do tipo Cfa. Os meses mais quentes ocorrem entre dezembro e fevereiro, com temperatura média de 22 ºC, enquanto os meses de junho, julho e agosto são os mais frios, com temperaturas médias variando entre -3 °C e 18 °C (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual da região é de 1.663 mm (LANZANOVA et al, 2009).

O talhão agrícola avaliado (Figura 1) recebe a denominação “Campo Nativo”, possui área de 14,53 hectares e declividade média do terreno de 8,21%. O cultivo de grãos foi implantado na área no ano de 2012, uma vez que anteriormente se destinava a campo nativo. Desde então, adota-se o sistema plantio direto, com rotação anual de culturas. O solo predominante é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico, caracterizado por teores mais altos de óxidos de ferro e fertilidade natural baixa. Além disso, o teor de argila no horizonte subsuperficial é bem maior do que no horizonte superficial, sendo esse incremento de argila percebido sem dificuldade quando se faz o exame de textura, em campo (EMBRAPA, 2018).

Figura 1 – Localização do talhão Campo Nativo



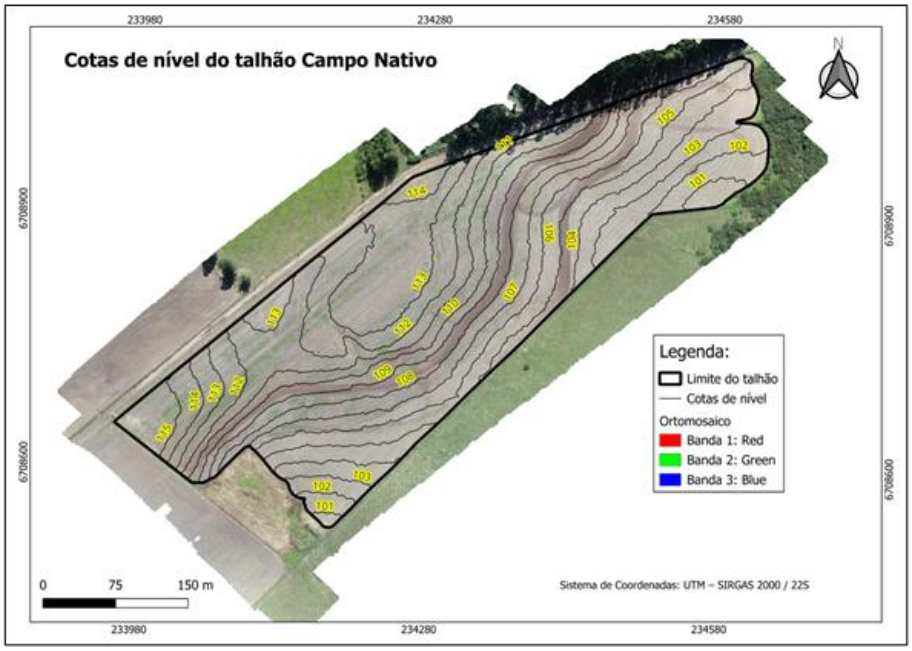
Fonte: Autores (2025)

A topografia do talhão foi determinada por meio de levantamento planialtimétrico, que envolve a coleta de dados relacionados às coordenadas planimétricas (X e Y) e cotas altimétricas (Z) dos pontos no terreno. Nesta etapa, foi utilizado um drone da marca DJI, modelo Phantom 4 Pro e um par de receptores GNSS com correção em tempo real (RTK). Com o auxílio dos receptores GNSS, foram distribuídos cinco pontos de controle georreferenciados ao longo do talhão. Em seguida, foi elaborado e executado o plano de voo com o drone.

ISBN 978-65-990392-6-3

Após a coleta dos dados em campo, iniciou-se o tratamento dos dados, com o auxílio do *software Agisoft Matashape Pro.* Nesta etapa, importou-se as imagens para o software e fez-se o alinhamento preliminar, a identificação e o georreferenciamento dos pontos de controle, com a atribuição das coordenadas. Em seguida, foi elaborada a nuvem de pontos, formada por milhares pontos dotados de coordenadas X, Y e Z, as quais foram a base para constituir curvas de nível do terreno, com equidistância vertical de 1 metro (Figura 2).

Figura 2 – Curvas de nível do talhão Campo Nativo



Fonte: Autores (2025)

Após criadas, as curvas de nível foram convertidas para o formato *shapefile* (SHP) e importadas para o *software* AgroCAD. A partir disso, foram elaborados cinco projetos de linhas, simulando a operação de semeadura com o uso de uma semeadora-adubadora equipada com 15 linhas, espaçadas a 0,45 m entre si.

O projeto 1 simulou a operação realizada com o piloto automático do trator configurado para linhas retas do tipo “AB”, sem considerar as curvas de nível do terreno. O projeto 2 também simulou a operação realizada com o piloto automático do trator configurado para linhas retas do tipo “AB”, sem considerar as curvas de nível do terreno, mas orientadas de forma perpendicular às linhas do projeto 1. O Projeto 3 simulou a operação realizada com o uso de uma curva de nível mestra como referência para a definição das linhas de semeadura. Já o projeto 4 simula a operação realizada com o uso de duas curvas de nível mestras como referência para a definição das linhas de semeadura. Por fim, o projeto 5 simula a operação realizada com o uso de três curvas de nível mestras como referência para a definição das linhas de semeadura.

Após a elaboração dos diferentes projetos, no AgroCad, foi utilizada a ferramenta de análise de declividades longitudinais para classificar os segmentos das linhas de circulação conforme a declividade, com amostragens realizadas a cada metro do percurso. As declividades longitudinais foram separadas em três classes: entre 0,0 e 2,5%, na cor verde; entre 2,6 e 5%, na cor amarelo e; maior que 5%, na cor vermelho. A partir disso, foi avaliada a porcentagem da área semeada pertencente a cada classe de declividade.

Com a mesma ferramenta do *software* AgroCad, foram determinadas as distâncias percorridas pelo conjunto mecanizado para efetuar a semeadura do talhão, considerando os diferentes projetos de linhas. Na classificação das declividades longitudinais, foram

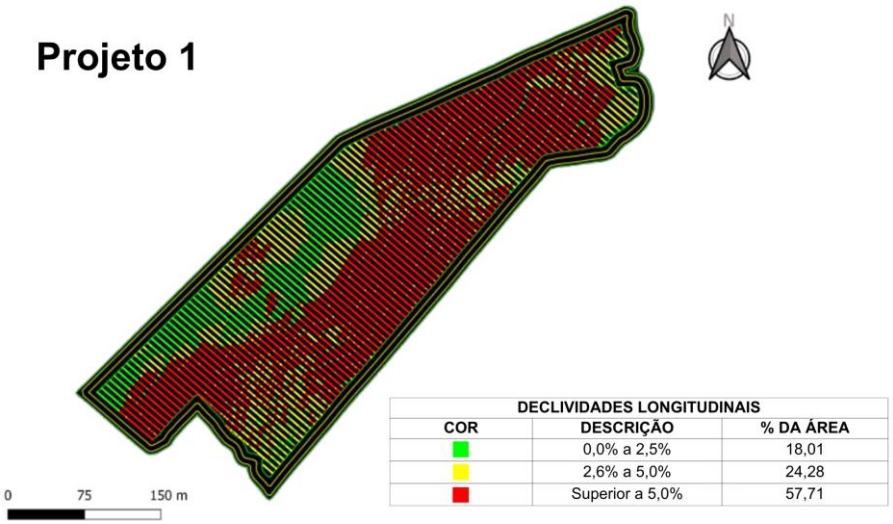
ISBN 978-65-990392-6-3

desconsideradas as linhas e manobras de cabeceira, enquanto na análise de distâncias percorridas, esses trechos foram incluídos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O projeto 1 (Figura 3) apresentou as maiores declividades longitudinais das linhas de semeadura, com 57,71% da área superior a 5% e apenas 18,01% do talhão com declividades entre 0,0% e 2,5%. Esse resultado evidencia que, caso a operação seja realizada neste sentido dentro do talhão, existe o favorecimento para a ocorrência de erosões ao longo do trajeto do mecanismo sulcador da semeadora-adubadora.

Figura 3 – Projeto 1, simulando a operação realizada com o piloto automático do trator configurado para linhas retas do tipo “AB”, sem considerar as curvas de nível do terreno.



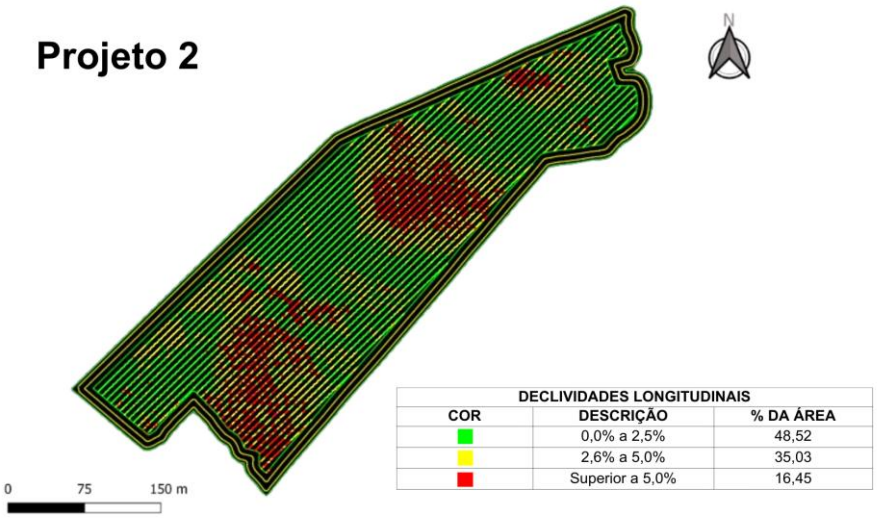
Fonte: Autores (2025)

O projeto 2 (Figura 4) demonstrou redução expressiva da área com declividade longitudinal das linhas de semeadura superior a 5%, em relação ao primeiro projeto. Neste caso, o sentido das linhas “AB” coincidiu com o das curvas de nível do terreno, evitando que a semeadura fosse realizada no sentido “a descer” na maior parte do talhão.

No projeto 3 (Figura 5), apenas 5,04% da área apresenta declividade longitudinal das linhas de semeadura superior a 5%. Por outro lado, 77,33% da área apresenta declividade longitudinal das linhas de semeadura entre 0 e 2,5%, o que representa o efeito positivo do uso de uma curva de nível mestra para efetuar a operação.

ISBN 978-65-990392-6-3

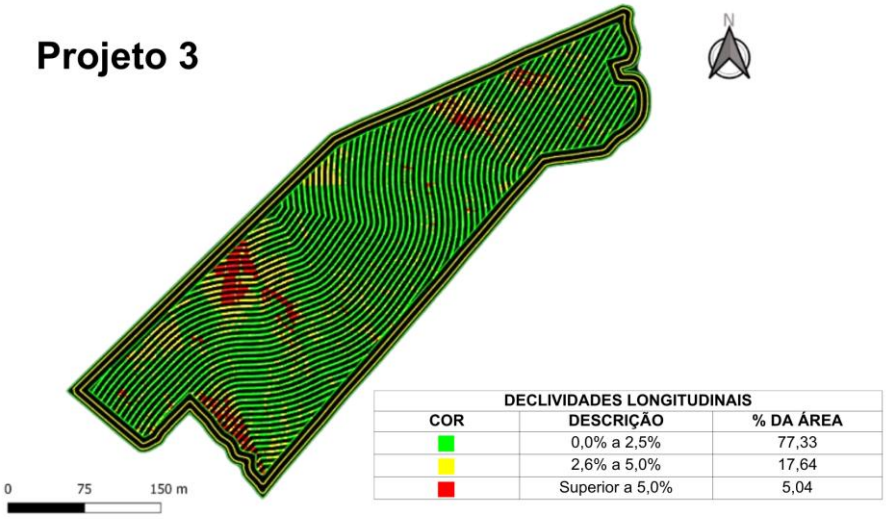
Figura 4 – Projeto 2, simulando a operação realizada com o piloto automático do trator configurado para linhas retas do tipo “AB”, sem considerar as curvas de nível do terreno, mas orientadas de forma perpendicular às linhas do Projeto 1.



DECLIVIDADES LONGITUDINAIS		
COR	DESCRIÇÃO	% DA ÁREA
	0,0% a 2,5%	48,52
	2,6% a 5,0%	35,03
	Superior a 5,0%	16,45

Fonte: Autores (2025)

Figura 5 – Projeto 3, simulando a operação com o uso de uma curva de nível mestra como referência para a definição das linhas de semeadura.



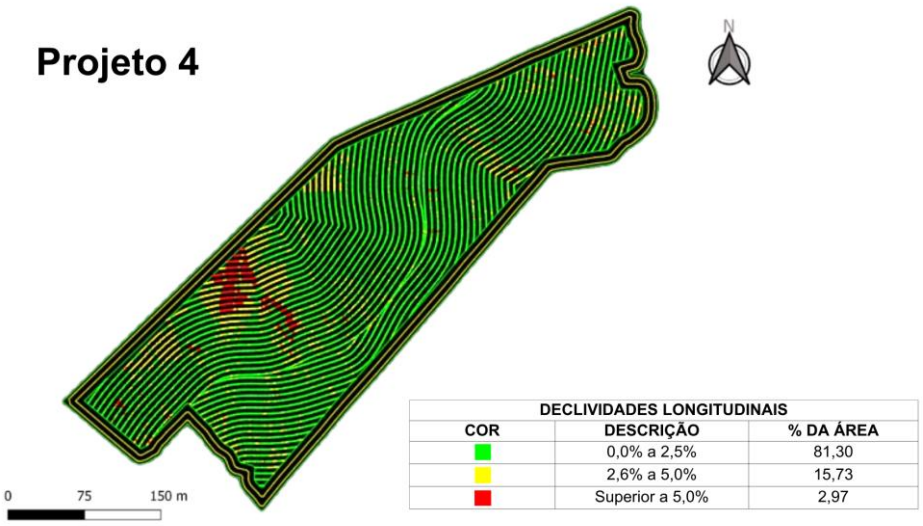
DECLIVIDADES LONGITUDINAIS		
COR	DESCRIÇÃO	% DA ÁREA
	0,0% a 2,5%	77,33
	2,6% a 5,0%	17,64
	Superior a 5,0%	5,04

Fonte: Autores (2025)

O projeto 4 (Figura 6) apresenta menos de 3% da área com declividade maior que 5% e mais de 81% da lavoura com declividade entre 0,0% e 2,5%, evidenciado o resultado positivo da adição de uma curva de nível mestra a mais, em relação ao projeto 3.

ISBN 978-65-990392-6-3

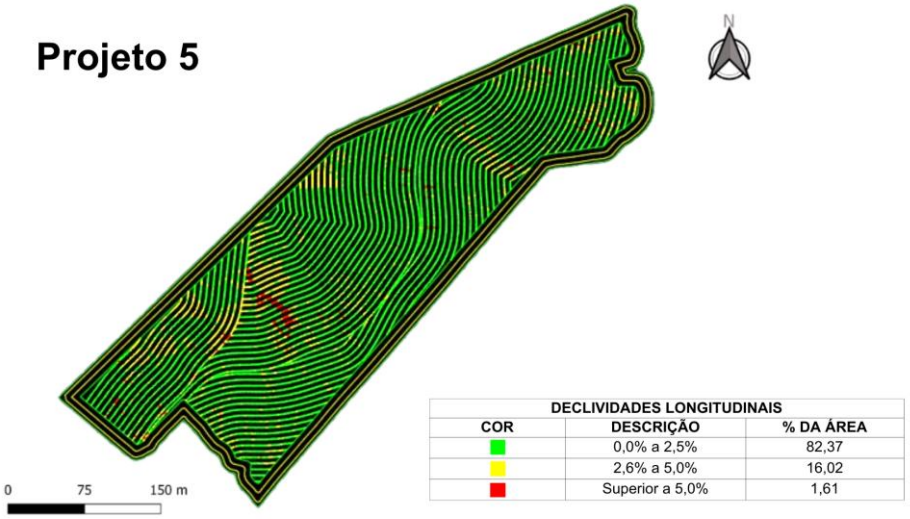
Figura 6 - Projeto 4, simulando a operação realizada com o uso de duas curvas de nível mestras como referência para a definição das linhas de semeadura.



Fonte: Autores (2025)

Por fim, o projeto 5 (Figura 7) apresentou 1,61% da área com declividade longitudinal superior a 5% e 82,37% da área com declividade longitudinal entre 0,0 e 2,5%.

Figura 7 - Projeto que simula a operação realizada com o uso de três curvas de nível mestras como referência para a definição das linhas de semeadura.



Fonte: Autores (2025)

A inclinação do terreno é um fator crucial na erosão hídrica, pois o aumento da declividade intensifica o volume e a velocidade do escoamento superficial, ao mesmo tempo em que diminui a infiltração de água no solo. Com a união desses fatores, o transporte e a desagregação do solo pela enxurrada são potencializados, especialmente em sulcos formados no sentido da encosta (COGO et al., 2003).

Sendo assim, com base nos mapas gerados, quando comparado o projeto 1 com o projeto 2, os quais se diferem apenas em função da modificação do sentido das linhas de semeadura no terreno, houve alteração de 18% para 48% na área com declividade longitudinal entre 0,0% e 2,5%. Isso demonstra a importância da tomada de decisão correta para qual

ISBN 978-65-990392-6-3

sentido as linhas devem ser direcionadas na área, mesmo sem considerar as curvas de nível do talhão.

Os projetos 3, 4 e 5 foram elaborados considerando as curvas de nível do terreno. Segundo a Embrapa (2013), a semeadura em contorno pode reduzir em mais de 50% as perdas de água e solo por erosão, além de aumentar significativamente a infiltração de água no solo. Essa informação corrobora com os resultados encontrados neste trabalho, visto que todos os projetos que utilizaram curvas de nível apresentaram menor declividade em comparação com aqueles que não as consideraram, evidenciando a tendência de menores perdas de solo por erosão.

Na Tabela1, são apresentadas as distâncias percorridas pelo conjunto mecanizado para realizar a operação de semeadura em todo o talhão, considerando os diferentes projetos de linhas e levando em consideração as manobras de cabeceira. A menor distância percorrida, de 22.479,73 m, foi encontrada com o uso do projeto 2, enquanto a maior distância percorrida, de 24.037,01 m, foi encontrada com o uso do projeto 5.

Tabela 1 - Distância percorrida pelo trator em cada projeto.

Projeto	Distância percorrida (m)
1	22.854,07
2	22.479,73
3	23.065,50
4	23.812,87
5	24.037,01

Fonte: Autores (2025)

A partir da tabela, nota-se que, conforme decresce o número de curvas de nível mestras, do projeto 5 para o 3, a distância percorrida também reduz, em função do menor número de subdivisões dentro do talhão. Este resultado é explicado pelo fato de que conforme aumenta-se o número de curvas de nível mestras, é necessário realizar mais manobras de cabeceira, o que colabora para o aumento da distância final percorrida. Além disso, devido ao tamanho e formato do talhão avaliado neste estudo, o uso de curvas de nível para realizar a operação de semeadura gerou muitas linhas curtas, o que também contribui para o aumento do número de manobras.

4 CONCLUSÃO

Nas condições em que este estudo foi conduzido, conclui-se que o uso de projetos de linhas considerando as curvas de nível do terreno permite a redução na declividade longitudinal das linhas de semeadura, o que, por sua vez, diminui o potencial de erosão do solo em áreas cultivadas. Quando são utilizadas linhas retas do tipo “AB”, a tomada de decisão adequada a respeito do sentido das linhas pode ser um fator crucial para minimizar a declividade.

Quando utilizada a semeadura em nível, o incremento no número de curvas mestras contribui para a redução da declividade longitudinal das linhas de semeadura, entretanto, implica no aumento na distância percorrida pelo conjunto mecanizado, sendo este aumento proporcional ao número de curvas mestras utilizadas.

ISBN 978-65-990392-6-3

Por fim, é necessário analisar que a maior distância percorrida com o uso de projetos de linhas de semeadura em nível gera maior consumo de combustível, resultando no aumento das despesas para realizar a operação no talhão. Em contrapartida, a prática da semeadura seguindo as curvas de nível do terreno minimizam os prejuízos ao solo, que é um dos recursos naturais mais importantes para a agricultura.

Dessa forma, em cada condição de tamanho, formato e relevo de talhão, é interessante analisar previamente a viabilidade de executar cada projeto de linhas, para tomar a melhor decisão.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift,** v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

BELGRANO, A. et al. Anthropogenic modifications: impacts and conservation strategies. **Scientific Reports**, v. 13, n. 12009, 2023.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 743-753, 2003.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5. ed. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. 355 p.

EMBRAPA. **Semeadura em contorno pode reduzir em 50% perdas de água e solo por erosão.** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2013. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/17952130/semeadura-em-contorno-pode-reduzir-em-50-perdas-de-agua-e-solo-por-erosao. Acesso em: 5 set. 2025.

FSG INOVAÇÃO AGRÍCOLA. **Linhas AB.** [Explicação sobre caminhos predefinidos via piloto automático para operações agrícolas]. Disponível em: https://www.fsginovacaoagricola.com/linhas-ab. Acesso em: 12 ago. 2025.

LANZANOVA, Mastrângelo Enivar. **Sistemas de culturas em plantio direto adaptados à pequena propriedade relacionados com a erosão e atributos de um Argissolo Vermelho.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/handle/1/3577. Acesso em: 7 set. 2025.

ONU BRASIL. **Relatório da ONU pede mudanças na forma como o mundo produz e consome alimentos.** Brasília, 19 jul. 2019. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/83759-relat%C3%B3rio-da-onu-pede-mudan%C3%A7as-na-forma-como-o-mundo-produz-e-consome-alimentos. Acesso em: 15 ago. 2025.

PENSAMENTO VERDE. **Conheça o plantio em curvas de nível e seus benefícios para a agricultura.** 2014. Disponível em: https://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/conheca-plantio-curvas-nivel-beneficios-agricultura/. Acesso em: 12 ago. 2025.

ISBN 978-65-990392-6-3

VIAN, C. E. F. et al. Origens, evolução e tendências da indústria de máquinas agrícolas. **Revista de Economia e Sociologia Rural,** v. 51, p. 719-744, 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-20032013000400006&script=sci_arttext. Acesso em: 24 ago. 2025. doi: 10.1590/S0103-20032013000400006.



CAPÍTULO 63

ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E SUA CORRELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA SOJA: UM ESTUDO SOBRE NDVI E NDRE

Vegetation Indices and Their Correlation with Soybean Yield: A Study about NDVI and NDRE

Luis Paulo Baldissera Schorr[1], Diego Duarte da Silveira[1], Tarik Cuchi[2], Sabrina Tolotti Peruzzo[1], Francisco Gerhardt Magro[1], João Miguel Taufer Alves[1], Laína Vitória Grasselli[1], Matheus Gnoatto[1]

[1] Centro de Ensino Superior Riograndense – CESURG, Rod. Leonel de Moura Brizola (BR 386), KM 138, Bairro Beira Campo,99560-000, Sarandi – RS, Brasil, diegosilveir@cesurg.com, luis.schorr@cesurg.com, sabrinaperuzzo@cesurg.com, franciscomagro@cesurg.com, joaoalves@cesurg.com, lainagrasselli@cesurg.com, matheusgnoatto@cesurg.com

[2] Empresa de Pesquisa de Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina / Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola – EPAGRI/CEPA, Rod. Admar Gonzaga, 1486, Itacorubi, 88034-001, Florianópolis – SC, Brasil, tarikcuchi@gmail.com

RESUMO

O sensoriamento remoto está sendo amplamente utilizado nos setores agropecuários, otimização das áreas agricultáveis e incrementos na produtividade. O presente trabalho teve por objetivo caracterizar a relação entre a produtividade de grãos de soja com diferentes índices de vegetação. O trabalho foi realizado no município de Dois Irmãos das Missões, RS, Brasil. Os dados de colheita foram obtidos por meio de colhedora equipada com sistema de monitoramento de colheita Fieldstar II. Os dados orbitais utilizaram imagens Sentinel 2 em 3 estádios da cultura da soja, onde realizou a mensuração dos índices de vegetação NDVI e NDRE. Os dados foram submetidos a análise de correlação de Pearson. Os resultados indicaram maior correlação da produtividade com o NDRE no estádio R8 da soja, sendo que para todos os estádios este índice teve resultados superiores de correlação quando comparado ao NDVI. Conclui-se que o índice NDRE é superior ao NDVI, obtendo maior correlação para a cultura da soja, sendo indicado para verificação da produtividade em cultivos agrícolas dessa cultura.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. Mecanização. Monitoramento.

ABSTRACT

Remote sensing has been widely applied in agricultural and livestock systems, contributing to the optimization of arable land use and improvements in crop yield. The present study aimed to characterize the relationship between soybean grain yield and different vegetation indices. The research was conducted in Dois Irmãos das Missões, RS, Brazil. Harvest data were collected using a combine harvester equipped with a Fieldstar II yield monitoring system. Orbital data were obtained from Sentinel-2 imagery at three soybean growth stages, from which the NDVI and NDRE vegetation indices were derived. Data were subjected to Pearson's correlation analysis. The results indicated a stronger correlation between grain yield and NDRE at the R8 growth stage, with NDRE consistently outperforming NDVI across all evaluated stages. It is concluded that NDRE is superior to NDVI for soybeans, showing higher correlations with yield, and is therefore recommended for yield assessments in soybean cropping systems.

Keywords: Remote sensing; Machinery; Monitoring.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de alimentos do mundo (XU et al., 2019). Nos últimos anos, o país teve como destaque a produção de carne, os cultivos de soja, milho, algodão e produtos florestais. Para a cultura da soja (*Glycine max*), a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) projeta um recorde na produção de soja na safra 2024/25, com estimativa de 169,7 milhões de toneladas, um aumento de 14,8% em relação à safra anterior, impulsionado por investimentos e boas condições climáticas (CONAB, 2025).

A cada ano aumenta-se a demanda por tecnologias em todos os setores produtivos, tanto em nosso país como no mundo (TAO et al., 2021), pois essas são essenciais para o aumento da produtividade das culturas agrícolas além do aumento da viabilidade dos cultivos por meio de decisões mais assertivas e com menor margem de erro (MAO et al., 2021). Por exemplo, o uso de imagens de satélites na agricultura é importante na tomada de decisões do produtor, fazendo com que o mesmo tome decisões mais corretas, através de uso de informações que irão reduzir os custos de produção (MOLIN et al.,2015).

O sensoriamento remoto (SR) tem o objetivo de facilitar atividades urbanas e rurais, sendo uma forma econômica para o mapeamento de áreas extensas (VALLE JÚNIOR et al., 2019). Atualmente, o sensoriamento remoto está sendo amplamente utilizado nos setores agropecuários, tendo um aumento bilionário no mercado mundial (PAUSCHINGER; KLAUSER, 2021). A utilização de dados de sensores para o monitoramento da agricultura pode ser considerado um dos avanços mais significativos na tecnologia agrícola (SHAMMI; MENG, 2021).

Neste quesito, os índices de vegetação (IVs), os quais são produtos de dados orbitais de SR, podem ser utilizados destacar a vegetação ocorrente em determinada área (FORMAGGIO; SANCHES, 2017). Desta forma, os IVs são fundamentais para monitorar inúmeros processos na agricultura, tendo destaque para auxiliar na melhoria de previsões do rendimento das culturas (XU; KATCHOVA, 2019; ANDRADE et al., 2022), identificação de estresses nutricionais (TRINDADE et al., 2019) e hídricos (SCHIRMBECK et al., 2019), diagnosticar biomassa (RODIGHERI et al., 2020), área foliar (BERGER et al., 2019) e cobertura de solo (MACEDO et al., 2020), entre outros.

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), é um dos mais utilizados para monitoramento agrícola (SANTOS et al., 2021). A difusão da técnica de imagens por NDVI é muito utilizada na agricultura, pois é de fácil aplicação e permite uma rápida detecção na variação das culturas (BERNARDI et al., 2014). Além disso, o NDVI apresenta forte correlação linear com o crescimento das culturas (SHIRATSUCHI et al. 2014). Pesquisas recentes salientam que o monitoramento do NDVI durante todo o ciclo da cultura pode fornecer informações de maior precisão, gerando melhores modelos para previsão do rendimento da soja (SARMIENTO et al., 2020; ANDRADE et al., 2022).

Já o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada no Red Edge (NDRE) vêm se mostrando uma alternativa ao NDVI, uma vez que apresenta maior sensibilidade ao teor de clorofila e à estrutura do dossel, evitando à saturação quando comparado ao NDVI, especialmente em estádios de alta biomassa das culturas agrícolas (GITELSON; MERZLYAK, 1997). Estudos recentes têm demonstrado que o NDRE é capaz de acompanhar todo o desenvolvimento da soja, sendo uma alternativa aos índices saturados (PEREIRA, 2020).

Diante do exposto, busca-se testar a hipótese de que a utilização de índices de vegetação durante o ciclo produtivo da cultura da soja tem elevada relação com a produtividade de grãos e, por isso, podem ser utilizados para estimar e analisar a produtividade da cultura. Assim, o presente trabalho busca verificar a correlação entre a produtividade da

soja e os índices NDVI e NDRE em uma área do município de Dois Irmãos das Missões, Rio Grande do Sul, Brasil.

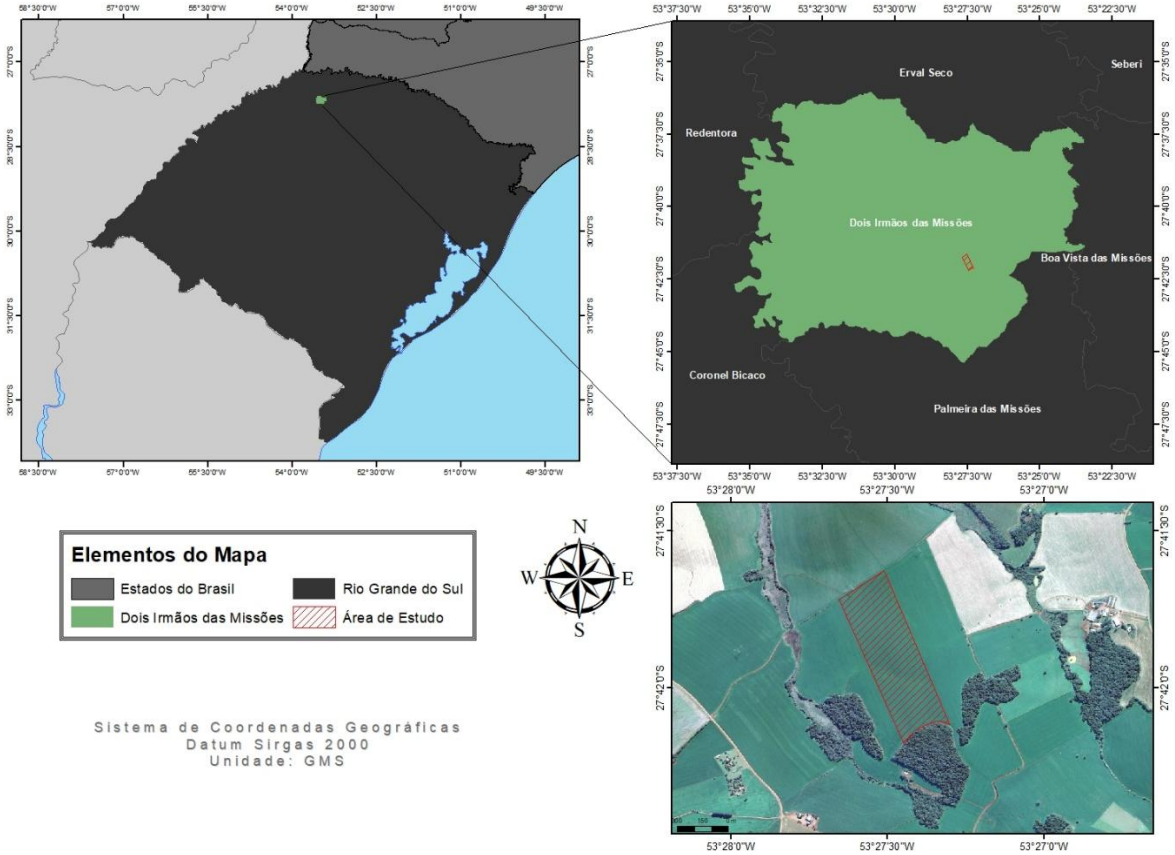
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Este estudo foi desenvolvido em uma propriedade rural localizada no município de Dois Irmãos das Missões, Rio Grande do Sul, Brasil, em área situada sob coordenadas 27 41’ 50’’ S e 53 27’ 24’’ O e em uma altitude de 527 m (Figura 1).

A área apresenta solo classificado como Latossolo Vermelho Distrófico (SANTOS et al., 2018) e conforme a classificação de Köeppen, o clima local é do tipo Cfa – Subtropical úmido (ALVARES et al., 2013). A área corresponde a um talhão de cultivo de soja da cultivar Brasmax Lança IPRO com espaçamento entre linhas de 45 cm e densidade de 12 plantas m-¹.

Figura 1 – Localização da área de estudo.



Fonte: Autores, 2025.

2.2 Coleta de dados

A colheita ocorreu quando as plantas de soja atingiram estádio final de maturação (R9), de forma mecanizada utilizando colhedora VALTRA Bc 7500, ano 2014, equipada com plataforma Draper 30 pés de corte, GNSS e piloto automático.

O sistema de monitoramento de colheita se denomina Fieldstar II, o qual corresponde a um conjunto de componentes responsáveis por coletar e armazenar informações sobre a cultura que está sendo colhida, como produtividade, umidade, rendimento seco, velocidade da

ISBN 978-65-990392-6-3

colheita, consumo de combustíveis e rotações de eixos dentre outras. O Fieldstar é composto por sensores e de ferramentas de georreferenciamento, que registram: a) produtividade, por meio de um medidor de fluxo, o qual mensura a massa dos grãos que batem no mesmo; b) umidade, por meio de sensor que mede tanto a umidade quanto a temperatura do grão; e c) localização por meio de antena GPS que georreferencia os pontos compilados pelo sistema.

Os dados armazenados pelo sistema foram submetidos ao programa que gerencia a colhedora, possibilitando a confecção de mapas de colheita na forma vetorial. Posteriormente, foi realizada a transformação dos mapas para possibilitar a extração dos valores médios de produtividade dos pontos amostrais com auxílio do software QGIS.

2.3 Coleta de dados orbitais

Esse estudo utilizou produtos dos satélites Sentinel-2, selecionando imagens com ausência de nuvens e que correspondam ao ciclo da cultura de soja na área de estudo. Essas imagens foram obtidas de forma gratuita por meio do site do United States Geological Survey (USGS). Importante destacar que essas imagens foram reprojetadas, apresentando nível 2 de processamento, correções radiométricas, geométricas e atmosféricas e valores de refletância de superfície, buscando corrigir possíveis efeitos da dispersão temporal, espacial, espectral, bem como da absorção de gases na atmosfera. Para imagens Sentinel 2A resolução espacial é de 10 m. Os índices de vegetação foram obtidos por meio dos valores digitais dos produtos dos satélites. Todo o processamento de imagens foi realizado com o software QGIS.

2.4 Análise e Processamento dos dados

A partir da produtividade (variável dependente) e dos diferentes índices de vegetação (variáveis explicativas), os dados foram submetidos à análise de correlação de Pearson para verificar a relação entre as variáveis. O processamento foi realizado pelo software R. Os índices de vegetação utilizados estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição dos índices de vegetação utilizados neste trabalho.

ÍNDICE	FÓRMULA
NDVI	NDVI = (NIR-VERMELHO) / (NIR+VERMELHO)
NDRE	NDRE = (NIR - RedEdge)/(NIR + RedEdge)

Legenda: NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index* (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada). NDRE – *Normalized Difference Red Edge Index* (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada no Red Edge). NIR – *Near Infrared* (Infravermelho próximo, banda espectral de 0,76 – 0,90 µm). VERMELHO (Red) Faixa espectral do vermelho, associada à absorção de clorofila (0,63 – 0,69 µm).RE (Red Edge) – Faixa espectral da borda do vermelho, transição entre o vermelho e o infravermelho próximo (0,70 – 0,75 µm).

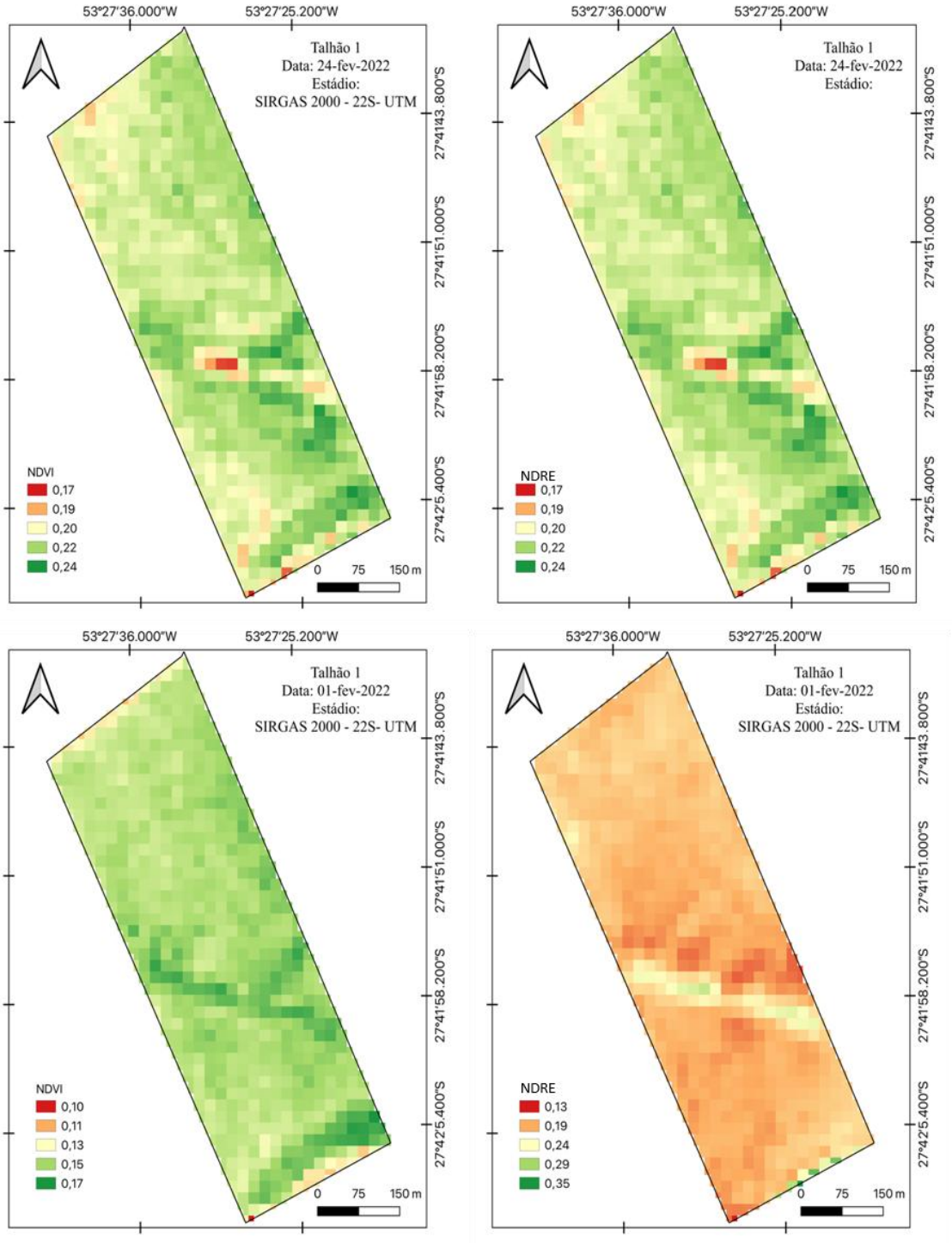
Fonte: Autores (2025)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho permitiram identificar que há variação dos índices de vegetação NDVI e NDRE para a cultura da soja na área analisada. A Figura 2 apresenta os resultados destes índices em 3 datas avaliadas.

ISBN 978-65-990392-6-3

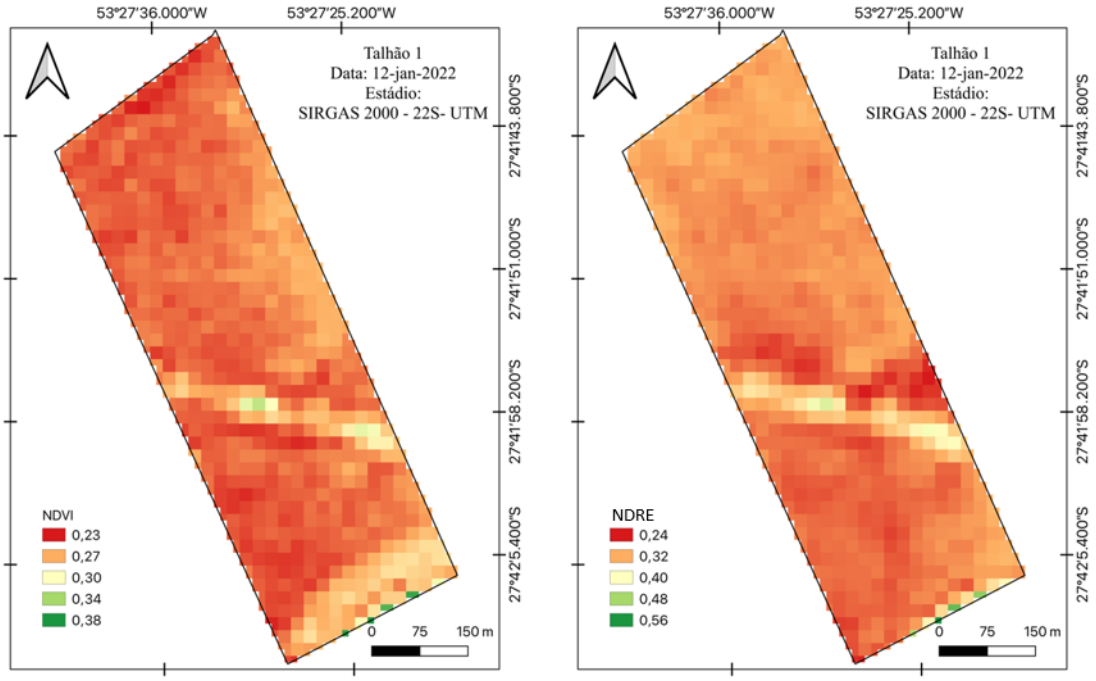
Figura 2 - Resultado dos índices de vegetação NDVI e NDRE em diferentes estádios fenológicos da cultura da soja.



Continua

ISBN 978-65-990392-6-3

Continuação Figura 2.



Fonte: Autores (2025).

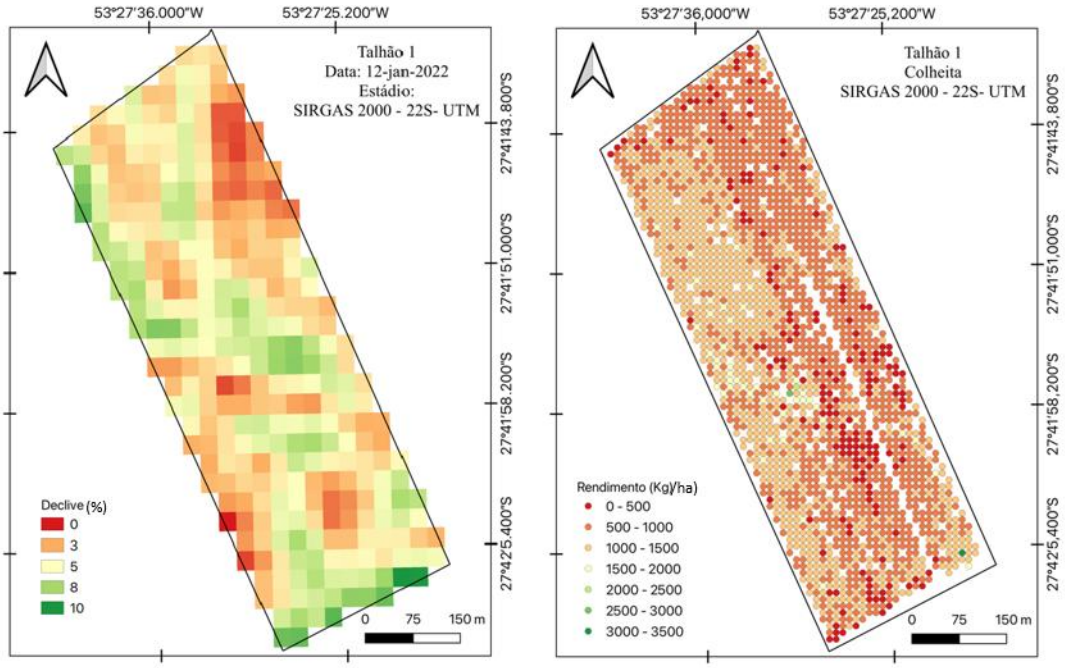
É possível verificar na Figura 2 que para a primeira avaliação os valores dos índices diminuem conforme o desenvolvimento da cultura. Isso ocorre tendo em vista que no estádio vegetativo as plantas buscam por biomassa, enquanto que no reprodutivo as plantas passam por florescimento (R1 e R2), desenvolvimento da vagem (R3 e R4), desenvolvimento do grão (R5 e R6) e maturação da planta (R7 e R8) (NEUMAIER, 2016), o que indicam uma perda de área foliar, caracterizando a diminuição dos índices de vegetação que consideram a questão da área foliar da cultura.

O rendimento (produtividade) da cultura é apresentado na Figura 3, juntamente com o declive do terreno. As imagens demonstram elevada variação, tendo um valor de declive variando de 0 a 10%, com maior distribuição de dados nas menores classes. Já para produtividade os valores variaram de 0 a 3500 Kg.ha-¹, tendo maior distribuição nas classes 500-2000 Kg.ha-¹. Ressalta-se que pode ser visto pela análise das Figuras 3 e 4 uma diferenciação entre alguns valores do NDVI e produtividade, não obtendo uma tendência concreta para decisão, ou seja, áreas que apresentam NDVI similar, mas com diferentes produtividades. Caron e Minuzzi (2022) destacam que isso pode resultar em uma baixa correlação entre as variáveis, pois áreas com alta e média produtividade podem ter atingido patamares diferentes de NDVI, mas que não foram identificados em vista da saturação do índice.

A análise de correlação entre as variáveis foi realizada considerando os valores entre as variáveis mensuradas. É importante destacar que a correlação de Pearson indica que se há existência de relação entre as variáveis quantitativas, bem como o grau (força) de relação entre elas. Quando o coeficiente de correlação apresenta valores positivos, as duas variáveis aumentam simultaneamente, enquanto que quando os valores de coeficiente são negativos à medida que uma variável aumenta, a outra diminui. Os valores dos resultados de correlação para este trabalho estão apresentados na Figura 4.

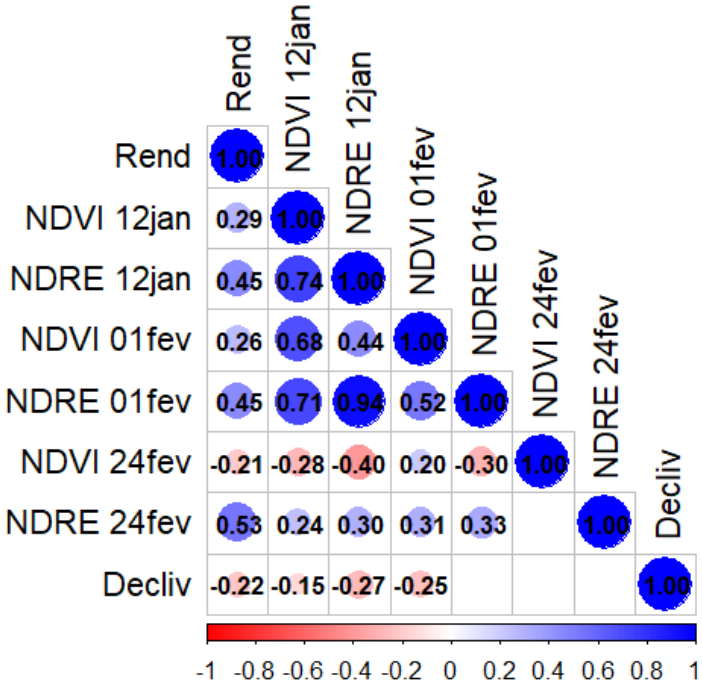
ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 3 – Declive do terreno (%) e Rendimento (kg.ha-¹).



Fonte: Autores (2025).

Figura 4 – Correlograma entre as variáveis analisadas.



Legenda: Rend – Rendimento (Kg.ha-¹); Decliv – Declividade (%).
Fonte: Autores (2025).

É possível observar a maior correlação ocorreu entre o NDRE em 24 de fevereiro e o rendimento da cultura (0,53), ou seja, identificando que há uma maior relação entre o índice de vegetação e produtividade quando a soja estiver entre os estádios R1 e R2. Resultados similares foram observados por Trindade et al. (2019), os quais verificaram a correlação do NDVI coletado no estádio R2 com a produtividade de R = 0,44. Os autores destacam que os

ISBN 978-65-990392-6-3

estádios do ciclo fenológico V5, R1 e R2 como os mais adequados para detectar o reflexo das condições de solo, bem como outros fatores que tem potencial de modificar questões espectrais na cultura da soja.

Também deve-se enfatizar que mesmo que o NDVI seja o amplamente conhecido entre os índices de vegetação, os maiores valores de correlação foram observados para o NDRE, o qual é variação do NDVI com objetivo de transformá-lo em mais sensitivo a outros parâmetros, como por exemplo o teor de clorofila nas folhas (MOLIN et al. 2015).

O fato do NDRE tem uma melhor correlação com a produtividade em todas as imagens pode estar relacionado com a maior habilidade em estimar as variações do teor de clorofila (EITEL et al., 2010) e doenças da cultura (BAJWA et al., 2017). Sampaio et al. (2021) analisando a cultura do milho e soja identificaram que o NDRE possui melhor capacidade de representar a atividade fotossintética em toda biomassa da cultura, pois este índice expressa melhor a atividade fotossintética em estádios fenológicos mais avançados dos vegetais. Resultados similares são destacados por Miller et al. (2018) e Taskos et al. (2015) que comparando o NDVI e o NDRE constataram que o NDRE pode ser usado em condições com maior biomassa do dossel vegetativo pois são menos sensíveis a saturação. Em resumo, o NDRE irá demorar mais para saturar.

Portanto, o uso de imagens NDVI e NDRE das fases reprodutivas da cultura da soja é mais indicado, pois é capaz de predizer o potencial produtivo da cultura, uma vez que existe uma alta correlação entre a produtividade de grãos da soja e o suprimento adequado de nutrientes e água até esta fase (SARMIENTO et al., 2020).

4. CONCLUSÃO

Com a execução desse trabalho pode concluir que há relação entre os índices de vegetação e a produtividade de soja, sendo essa correlação moderada para alta. O índice NDRE obteve os melhores resultados, pois apresenta-se com maior sensibilidade para análise da vegetação quando comparado ao NDVI.

Para a realização de trabalhos indica-se a avaliação nos estádios R2 da cultura. Por fim, sugere-se a realização de novos trabalhos para verificar a relação com outros índices de vegetação, além de construir modelos para estimativa da produtividade, bem como a difusão para diversas áreas e distintas condições de cultivo como data de semeadura e grau de maturação de cultivares.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift,** v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

ANDRADE, T. G. et al. Soybean yield prediction using remote sensing in southwestern Piauí state, Brazil. **Caatinga**, v. 35, n. 1, p. 105–116, 2022. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252022v35n111rc.

BAJWA, S. G., RUPE, J. C., MASON, J. Soybean disease monitoring with leaf reflectance. **Remote Sensing**, v. 9, n. 2, p. 127, 2017.

ISBN 978-65-990392-6-3

BERGER, R. et al. Índices de vegetação para a estimativa do índice de área foliar em plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith**. Ciência Florestal**, v. 29, p. 885–889, 2019.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos:** safra 2024/25. Brasília, 2025. Disponível em: https://www.conab.gov.br/. Acesso em: 01 set. 2025.

EITEL, J. U., KEEFE, R. F., LONG, D. S., DAVIS, A. S., VIERLING, L. A. Active ground optical remote sensing for improved monitoring of seedling stress in nurseries. **Sensors**, v. 10, n. 4, p. 2843-2850, 2010

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. DA. **Sensoriamento Remoto em Agricultura.** São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

GITELSON, A.; MERZLYAK, M. N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. **International Journal of Remote Sensing,** v. 18, n. 12, p. 2691–2697, 1997.

MACEDO, C. E. S. et al. Detecção da variação de cobertura vegetal a partir da estimativa do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) na unidade de conservação do Parque Estadual das Carnaúbas - CE com utilização de técnicas do sensoriamento remoto. **Anuário do Instituto de Geociências,** v. 43, p. 477–485, 2020.

MILLER, J. J. et al. Characterizing soybean vigor and productivity using multiple crop canopy sensor readings. **Field Crops Research**, v. 216, p. 22- 31, 2018.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

PAUSCHINGER, D.; KLAUSER, F. R. The introduction of digital technologies into agriculture: Space, materiality and the public-private interacting forms of authority and expertise. **Journal of Rural Studies,** 2021.

PEREIRA, F. D. **Análise da variabilidade espaço-temporal da cultura da soja por imagens de drone**. Campinas, SP: 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. 2021.

RODIGHERI, G. et al. Net primary productivity and dry matter in soybean cultivation utilizing data of NDVI multi-sensors. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,** v. 42, p. 431–436, 2020.

SAMPAIO, M. I. R. et al. Análise dos índices de vegetação NDVI e NDRE em imagens obtidas por meio de sensor embarcado em um RPAS para as culturas da soja (*Glycine max*) e milho (*Zea mays*) irrigados. **Rev. bras. Geom**., Curitiba, v. 9, n. 4, p. 350-362, 2021.

SANTOS, H. G. dos et al. **Brazilian Soil Classification System.** 5. ed. reed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SARMIENTO, C. M. et al. A spectral agrometeorological model for estimating soybean grain productivity in Mato Grosso, Brazil. **Engenharia Agrícola,** v. 40, p. 405–412, 2020.

ISBN 978-65-990392-6-3

SCHIRMBECK, L. W. et al. Condições hídricas de lavoura de soja usando sensoriamento remoto terrestre. **Agrometeoros,** v. 27, p. 173–181, 2019.

SHAMMI, S. A.; MENG, Q. Use time series NDVI and EVI to develop dynamic crop growth metrics for yield modeling. **Ecological Indicators,** v. 121, p. 107124, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107124.

SHIRATSUCHI, L. S. et al. Sensoriamento remoto: conceitos básicos e aplicações na agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C. et al. **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília: Embrapa, 2014. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/114687/1/Agricultura-de-precisao-cap.4.pdf. Acesso em: 06 jun. 2025.

TAO, W. et al. Review of the internet of things communication technologies in smart agriculture and challenges. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2021.

TASKOS, D. G. et al. Using active canopy sensors and chlorophyll meters to estimate grapevine nitrogen status and productivity. **Precision Agriculture**, v. 16, n. 1, p. 77-98, 2015.

TRINDADE, F. S. et al. Relação espectro-temporal de índices de vegetação com atributos do solo e produtividade da soja. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, p. 1–11, 2019.

VALLE JÚNIOR, R. F. et al. Diagnosis of degraded pastures using an improved NDVI-based remote sensing approach: An application to the Environment Protection Area of Uberaba River Basin (Minas Gerais, Brazil). **Remote Sensing Applications: Society and Environment,** v. 14, 2019.

XU, C.; KATCHOVA, A. L. Predicting soybean yield with NDVI using a flexible Fourier transform model. **Journal of Agricultural and Applied Economics**, v. 51, n. 3, p. 402–416, 2019.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 64

CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICES ESPECTRAIS E A PRODUTIVIDADE DA SOJA EM DIFERENTES ESTÁDIOS FENOLÓGICOS

Correlation between spectral indices and soybean yield at different phenological stages

Laura da Silva Camargo[1]; Luiz Gustavo Kern[1]; André Müllich[1]; Luiz Felipe Silveira Pavão[1]; Marcelo S. Farias[1]; Luciano Z. Pes [1]; Ivan C. Maldaner[1]; Jaqueline Sgarbossa[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria-RS, Brasil, camargo.laura@acad.ufsm.br; kernluizgustavo@gmail.com, andre.mullich@hotmail.com, felipepavao14@gmail.com, marcelo.farias@ufsm.br, lucianopes@politecnico.ufsm.br, ivan.maldaner@ufsm.br, sgarbossa.jaqueline@ufsm.br

RESUMO

Este estudo teve como objetivo analisar a correlação entre índices de vegetação (IV's) obtidos por sensoriamento remoto orbital e a produtividade da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) em diferentes estádios fenológicos. O experimento foi conduzido em dois talhões agrícolas em Santa Maria, RS. Foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2 (sensor MSI) para o cálculo dos IV's NDVI, GNDVI e NDMI, enquanto os dados de produtividade foram obtidos por colhedora equipada com o sistema *Yieldtrakk*®. A análise baseou-se no coeficiente de correlação de *Pearson* (95% de confiança). No talhão Diogo, o estádio R4 apresentou as maiores correlações para os três índices, o que caracteriza essa época como uma etapa crítica para o monitoramento espectral. No talhão Barragem, observou-se correlações no estádio R5 para NDVI e GNDVI e em R7 para NDMI, fator determinante para assumir maior variabilidade espacial neste talhão, possivelmente associada aos fatores edáficos e de manejo. Conclui-se que os IV's apresentam potencial para apoiar práticas de Agricultura de Precisão e recomenda-se a continuidade de estudos em diferentes safras.

Palavras-chave: Predição. Sensoriamento remote. Índices Espectrais.

ABSTRACT

The present study aimed to analyze the relationship between vegetation indices (VIs) obtained from orbital remote sensing and soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) yield at different phenological stages. The experiment was conducted in two fields located in Santa Maria, RS, Brazil. Sentinel-2 (MSI sensor) imagery was used to calculate the VIs NDVI, GNDVI, and NDMI, while yield data were collected using a combine harvester equipped with the Yieldtrakk® system. The analysis was based on Pearson's correlation coefficient (95% significance level). In Field 1, stage R4 showed the highest correlations for the three indices, representing a critical phase for spectral monitoring. In Field 2, correlations were observed at R5 for NDVI and GNDVI and at R7 for NDMI, reflecting greater spatial heterogeneity possibly associated with edaphic and management factors. It is concluded that VIs have potential to support precision agriculture practices, and further studies under different crop seasons are recommended.

Keywords: Prediction. Remote sensing. Spectral indices.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

A Agricultura de Precisão (AP) é caracterizada por gestão subsidiada de informações georreferenciadas, que permitem acompanhar e manejar culturas agrícolas com elevado detalhamento espacial e temporal. Seu propósito central é aumentar a eficiência produtiva e a sustentabilidade do sistema agrícola, reduzir o uso de insumos e os impactos ambientais, ao mesmo tempo em que maximiza a produtividade (TSCHIEDEL et al., 2002; MOLIN; AMARAL, 2020).

Essa abordagem abrange um amplo conjunto de ferramentas digitais que possibilitam monitorar e intervir tanto durante, quanto após a safra. Entre as tecnologias essenciais estão os sensores de produtividade inseridos nas colhedoras, que fornecem mapas de rendimento produtivo em alta resolução espacial; *softwares* de geoprocessamento, que permitem o processamento e a análise dos dados; além de sensores remotos que disponibilizam índices espectrais, como NDVI, GNDVI e NDMI, capazes de refletir o vigor vegetativo, o estado nutricional e as condições hídricas da cultura (HABOUDANE et al., 2004; FONTANA et al., 2015).

No Brasil, a soja se destaca como a principal commoditie agrícola e desempenha papel fundamental no Agronegócio. Portanto, compreender a variabilidade espacial e temporal dessa cultura é fundamental para otimizar o manejo localizado, uma vez que fatores edáficos e climáticos afetam diretamente a produtividade. Avanços recentes na AP têm contribuído para observar as causas e efeitos dessa variabilidade, o que colabora para decisões assertivas e sustentáveis (CRUSIOL et al., 2024).

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é um dos índices mais utilizados no monitoramento de culturas como a soja. O GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*) e o NDMI (*Normalized Difference Moisture Index*) contribuem tal qual o NDVI, e oferecem informações específicas sobre o teor de clorofila e a condição hídrica da vegetação, respectivamente.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo analisar a correlação entre a produtividade da soja, medida por colhedora com sensores de rendimento, e os índices espectrais NDVI, GNDVI e NDMI. Especificamente, pretende-se: (i) avaliar o nível de associação entre produtividade e índices espectrais; (ii) comparar os resultados em dois talhões distintos, a fim de verificar diferenças relacionadas às características espaciais e de manejo; e (iii) identificar os estádios fenológicos em que os índices apresentam maior sensibilidade para representar a variabilidade produtiva com destaque para seu potencial em subsidiar decisões na Agricultura de Preditiva.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa utilizou imagens de satélite Sentinel-2 e dados de produtividade obtidos em campo para avaliar a variabilidade espacial da soja, em dois talhões experimentais. Foram analisados três índices espectrais: NDVI, GNDVI e NDMI, que indicam vigor vegetativo, teor de clorofila e condição hídrica da cultura. Os dados de rendimento foram coletados por colhedora equipada com sensores georreferenciados. Em seguida, os valores médios dos índices de cada estádio fenológico da soja foram extraídos e comparados com a produtividade por meio de análise estatística. Esse procedimento permitiu identificar os estádios mais sensíveis ao monitoramento remoto e compreender a relação entre os índices espectrais e a variabilidade produtiva.

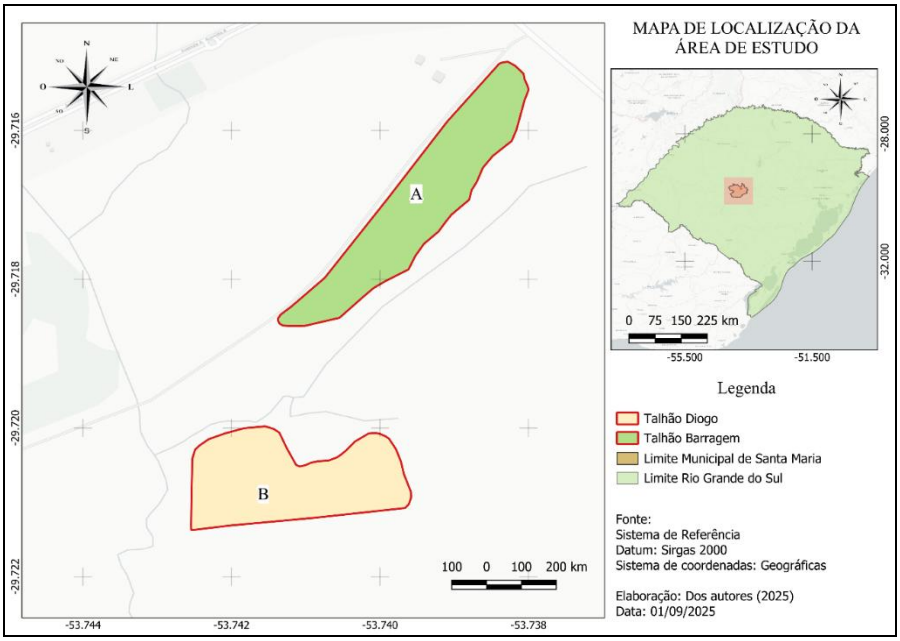
PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque/RS · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

2.1 Área de estudo

O experimento foi realizado em dois talhões agrícolas, denominados “Barragem” e “Diogo”, localizados na Área Agropecuária do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no município de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, nas coordenadas centrais (29°43’40’’ S; 53°45’19’’ W) e altitude média de 95 m em relação ao nível médio dos marres. O clima da região é classificado como subtropical úmido (Cfa, Köppen-Geiger), caracterizado por verões quentes e precipitação bem distribuída ao longo do ano, apresentando médias anuais de 1.700 mm de precipitação e 19 °C de temperatura (SECRETARIA DO PLANEJAMENTO, GOVERNANÇA E GESTÃO DO RIO GRANDE DO SUL, 2025). Os solos predominantes são Argissolo Vermelho Distrófico Típico, de textura argilosa, com boa profundidade e elevada capacidade de armazenamento de água, tradicionalmente utilizados para a produção intensiva da cultura da soja.

Figura 1. Localização dos talhões Barragem e Diogo na Área Agropecuária, do Colégio Politécnico da UFSM.



Fonte: Autores (2025)

2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados

A cultivar de soja utilizada foi a BRASMAX Zeus IPRO (GMR 5.5), semeada em 28/10/2024 no talhão Barragem e em 14/11/2024 no talhão Diogo. O ciclo da cultura foi acompanhado com base na escala fenológica de Fehr e Caviness (1977) e contempla os estádios vegetativos e reprodutivos: V4 (quatro nós com folhas completamente desenvolvidas), V9 (nove nós), R4 (vagem completamente desenvolvida em um dos quatro últimos nós do caule principal), R5 (início de enchimento de grãos) e R7 (início da maturação, quando uma vagem do caule principal apresenta coloração amarelada).

As datas de semeadura, os dias após a semeadura (DAS) correspondentes a cada estádio fenológico e as datas de colheita para os dois talhões encontram-se resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Datas de semeadura, colheita e dias após a semeadura (DAS) correspondentes aos estádios fenológicos de soja nos talhões Diogo e Barragem.

Talhão	Data de semeadura	DAS (V4)	DAS (V9)	DAS (R4)	DAS (R5)	DAS (R7)	Data de colheita
Barragem	28/10/2024	45	67	92	108	141	06/03/2025
Diogo	14/11/2024	28	43	78	88	124	23/03/2025

Fonte: Autores (2025)

Os dados de produtividade foram coletados na safra de 2024/2025 por meio de uma colhedora autopropelida Massey Ferguson®, modelo MF 4690HD equipada com o sistema *Yieldtrakk*®, que utiliza sensores *ópticos* para o registro da produtividade em tempo real e georreferenciada. Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2A sensor MSI (*Multi Spectral Instrument*) já convertidas para valores de reflectância de superfície. O satélite faz parte da missão espacial desenvolvida pela The European Space Agency (ESA), com imagens multiespectrais de média resolução e faixa ampla, possui resolução temporal de 5 dias como referência à linha do equador. A seleção e análise de imagens foi realizada na plataforma GEE considerando a coleção de imagens "COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED", referente as imagens com dados de reflectância de superfície e foram consideradas apenas imagens com 0% de nuvens na área de estudo.

A partir dessa metodologia foram extraídos os índices espectrais NDVI, GNDVI e NDMI (Tabela 2). O NDVI foi utilizado para representar o vigor vegetativo e a biomassa da cultura, o GNDVI para estimar a atividade fotossintética em função do teor de clorofila e o NDMI para indicar a condição hídrica da vegetação.

Tabela 2. Equações e referências dos índices de vegetação utilizados no estudo.

Índice	Equação	Bandas (Sentinel-2)	Referência
NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)	$\frac{NIR+RED}{NIR-RED}$	B8 (NIR, 842 nm) B4 (RED, 665 nm)	(ROUSE, 1973)
GNDVI *(Green Normalized Difference Vegetation Index)*	$\frac{NIR+GREEN}{NIR-GREEN}$	B8 (NIR, 842 nm) B3 (GREEN, 560 nm)	(GITELSON, 1996)
NDMI (*Normalized Difference Moisture Index*)	$\frac{NIR+SWIR}{NIR-SWIR}$	B8 (NIR, 842 nm) B11 (SWIR, 1610 nm)	(GAO, 1996)

Fonte: Autores (2025)

O processamento e a análise dos dados foram realizados com o apoio do *software* QGIS 3.34.4 e do *plugin Smart-Map* (PEREIRA et al. 2022). No *software* Rstudio, primeiramente realizou-se a identificação e remoção de valores discrepantes (*outliers*). Utilizou-se o método de Tukey (1977), com base no intervalo interquartil (IQR). Valores inferiores a Q1−1,5 × IQR ou superiores a Q3+1,5 × IQR foram considerados discrepantes e removidos da análise, conforme a equação:

Limite inferior = Q1−1,5·(IQR)

Limite Superior = Q3+1,5·(IQR)

Onde:

Q1: Primeiro quartil (25% dos dados ordenados)

Q3: Terceiro quartil (75% dos dados ordenados)

ISBN 978-65-990392-6-3

IQR = Q3−Q1: Intervalo interquartil
1.5: Faixa de tolerância para detectar valores extremos

Em seguida, foram calculados os valores médios dos índices espectrais em diferentes estádios fenológicos da soja, que posteriormente fossem integrados aos mapas de produtividade, para avaliar a variabilidade das áreas de estudo. Por fim, a associação entre produtividade e índices espectrais foi analisada por meio do coeficiente de correlação de *Pearson* (Equação 1), com nível de confiança de 95%.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y-\bar{y})^2}} \quad (1)$$

Onde: xi e yi= observações dos dois atributos (produtividade e IV's) em cada ponto *i*; $\bar{x}$ e $\bar{y}$ = médias amostrais; n = número de pares.

Essa abordagem permitiu identificar os estádios fenológicos mais representativos para caracterizar a variabilidade espacial da soja. De acordo com estudos recentes (FARIAS et al., 2023), o pico vegetativo e a fase reprodutiva inicial apresentam maior resposta espectral, por consequência considerados os períodos mais críticos para o monitoramento da cultura, o que fundamenta a estratégia metodológica adotada neste trabalho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

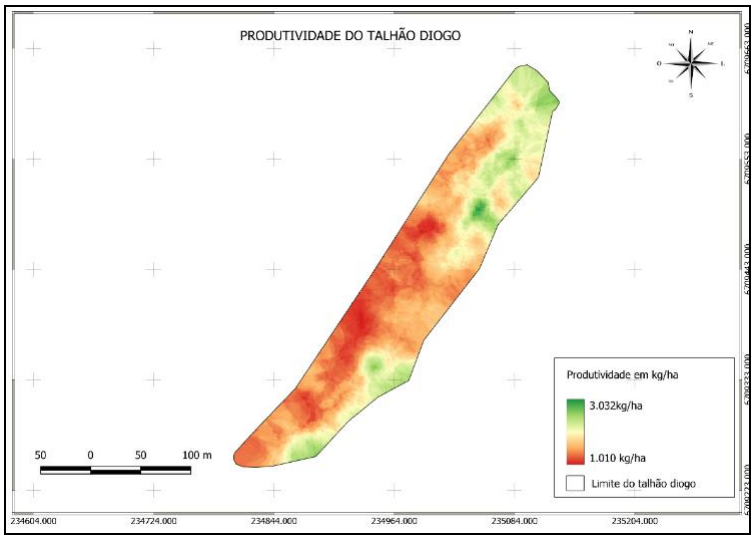
Embora tenha sido utilizada a mesma cultivar de soja (BRASMAX Zeus IPRO, GMR 5.5) em ambos os talhões, os estádios fenológicos foram alcançados em diferentes números de dias após a semeadura (DAS). Essa diferença está associada principalmente à época de implantação: o talhão Barragem foi semeado em 28/10/2024, enquanto o talhão Diogo em 14/11/2024. Semeaduras tardias tendem a apresentar ciclos encurtados, pois ocorrem sob condições de maior acúmulo térmico e fotoperíodo distinto, acelerando o desenvolvimento da cultura. Assim, ainda que a cultivar seja a mesma, o calendário fenológico variou entre as áreas, o que impacta diretamente na resposta espectral e produtiva.

Na Figura 2 está apresentado o mapa de produtividade do talhão Diogo, no qual os valores oscilaram entre 1.010 e 3.032 kg ha^{-1}. Nota-se que, a distribuição espacial apresenta certa homogeneidade, com áreas de maior rendimento concentradas nas porções centrais e menores produtividades nas extremidades do talhão. Esse padrão pode estar relacionado às condições edáficas e de manejo, o que reduziu a amplitude de variação intra-talhão.

Já a Figura 3 mostra a produtividade do talhão Barragem, onde os valores variaram de 786 a 4.532 kg ha^{-1}, evidencia maior amplitude em relação ao talhão Diogo. Observa-se elevada heterogeneidade espacial, com mosaicos de alta e baixa produtividade distribuídos irregularmente. Essa variabilidade pode estar associada a diferenças edáficas e práticas de manejo diferenciadas, além do fato de o talhão ter sido implantado mais cedo, sob condições ambientais distintas.

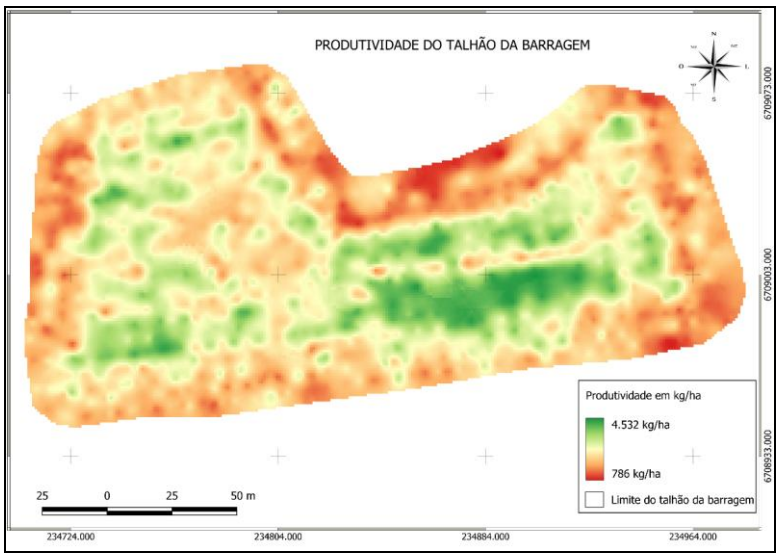
ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2. Mapa de produtividade de soja do talhão Diogo, Área Agropecuária do Colégio Politécnico da UFSM.



Fonte: Autores (2025).

Figura 3. Mapa de produtividade de soja do talhão Barragem, Área Agropecuária do Colégio Politécnico da UFSM.

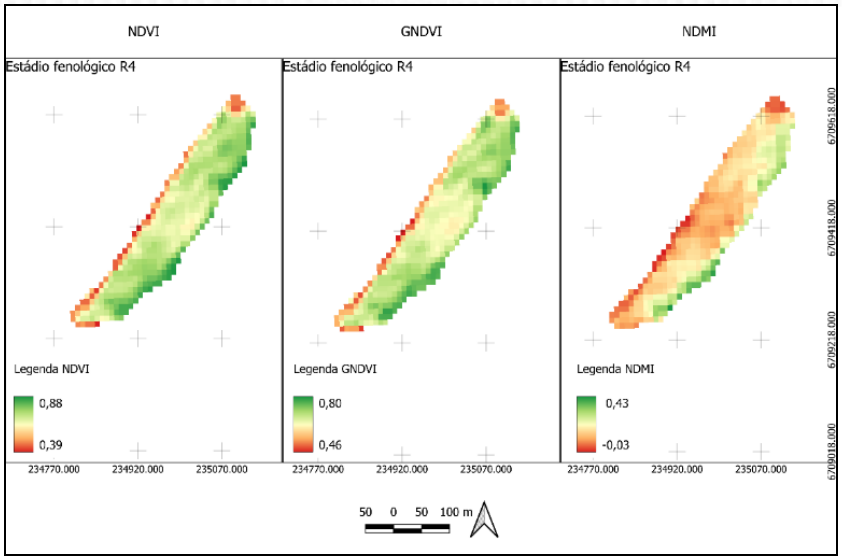


Fonte: Autores (2025).

Os resultados da análise de correlação de *Pearson* entre índices espectrais e produtividade são apresentados na Tabela 2. No talhão Diogo, as correlações foram mais expressivas, variando de 0,09 a 0,32, sendo a maioria significativa a 95% de confiança. O estádio R4 destacou-se como o mais representativo, com coeficientes de r = 0,25 (NDVI), r = 0,28 (GNDVI) e r = 0,32 (NDMI), todos significativos. Esses resultados reforçam que a fase de enchimento inicial dos grãos é crítica para o monitoramento espectral, pois combina elevado vigor vegetativo e início da definição do potencial produtivo. A Figura 4 ilustra os mapas dos índices espectrais no estádio R4 do talhão Diogo e evidencia correspondência espacial entre áreas de maior índice e zonas de maior rendimento, o que sustenta o potencial preditivo dos índices nesse momento do ciclo.

ISBN 978-65-990392-6-3

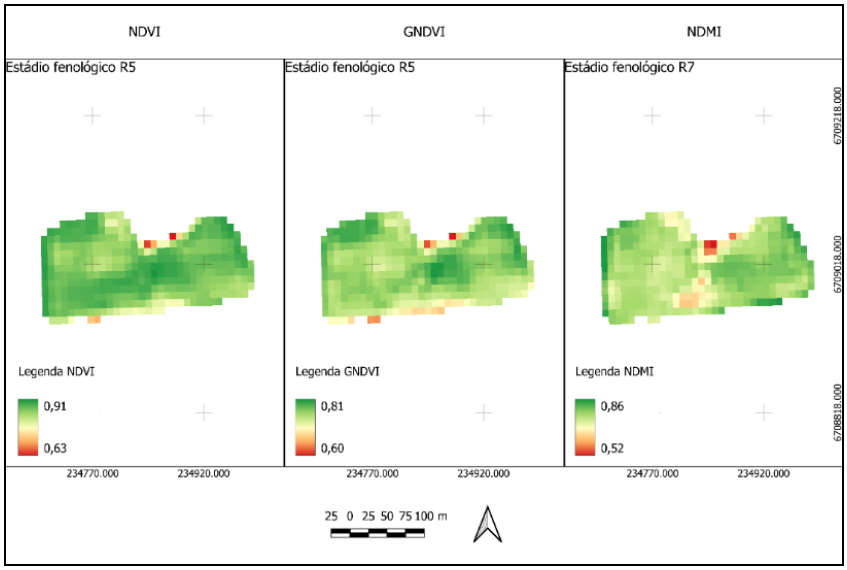
Figura 4. Índices espectrais do estádio fenológico R4 do talhão Diogo.



Fonte: Autores (2025).

No talhão Barragem, as correlações foram mais baixas, variando de 0,07 a 0,23, com significância restrita a estádios específicos: R5 para NDVI (r = 0,19) e GNDVI (r = 0,18), e R7 para NDMI (r = 0,23). A Figura 5 mostra a distribuição espacial dos índices nesses estádios, o que corresponde a maior variabilidade entre áreas do talhão. Esse resultado sugere que a resposta espectral da soja nesse ambiente foi modulada por fatores locais como variações edáficas e meteorológicas, reduzindo a consistência das correlações. Assim, ao contrário do talhão Diogo, não houve um único estádio crítico, mas diferentes fases que apresentaram relevância dependendo do índice analisado.

Figura 5. Índices espectrais dos estádios fenológicos R5 e R7 do talhão Barragem.



Fonte: Autores (2025).

A baixa correlação encontrada nos dados apresentados não é um problema pelo método usado (Pearson), mas sim reflexo de fatores externos à estatística, que influenciaram a variabilidade e reduziram a força da relação, podendo ser condições edáficas, manejo, variabilidade natural da lavoura, qualidade dos dados ou até ruído do sensor.

A safra 2024/25 foi marcada pela ocorrência do Fenômeno La Niña no Rio Grande do Sul. No local do estudo, o acumulado total de precipitação, da semeadura até a colheita no talhão Barragem e Diogo, foram de 271,6 mm e 231,8 mm respectivamente (INMET, 2025), com a presença de longos períodos sem chuvas. A soja demanda precipitação acumulada de 450-800 mm (EMBRAPA, 2013), ou seja, as condições meteorológicas observadas foram limitantes para o desenvolvimento da cultura e prejudicou o desempenho agronômico final.

Tabela 2. Coeficientes de correlação de Pearson entre índices espectrais e produtividade da soja nos talhões Diogo e Barragem.

Fenologia	NDVI Diogo	NDVI Barragem	GNDVI Diogo	GNDVI Barragem	NDMI Diogo	NDMI Barragem
V4	0,0949	0,0700	0,1165	-0,0291	0,0940*	0,0368
V9	0,1303*	0,1433*	0,1150*	0,1404*	0,1852*	0,0988
R4	0,2532*	0,1262	0,2806*	0,0815	0,3163*	0,1310
R5	0,1680*	0,1942*	0,1948*	0,1805*	0,1976*	0,1543*
R7	0,1644*	0,1743*	0,2072*	0,1178	0,1901*	0,2347*

Legenda: * indica que o coeficiente é significativo ($p < 0,05$)
Fonte: Autores (2025).

De forma geral, os resultados estão em consonância com a literatura. Trindade et al. (2019) apontam maior resposta espectral em fases reprodutivas iniciais. No entanto, deve-se considerar limitações metodológicas, como a resolução espacial das imagens Sentinel-2 (10 m), que pode não captar variações de microescala, além da análise estar restrita a uma única safra. Esses fatores reforçam a necessidade de estudos complementares e integram dados proximais (drones, sensores de solo) e séries temporais mais longas para aumentar a robustez da predição de produtividade.

4 CONCLUSÃO

Os índices NDVI, GNDVI e NDMI mostraram-se eficientes para identificar estádios fenológicos críticos associados à produtividade. De forma geral, os resultados atenderam ao objetivo de avaliar a associação entre índices espectrais e produtividade, permitindo identificar os momentos de maior sensibilidade e subsidiar interpretações em Agricultura Preditiva. No talhão Diogo, o estádio R4 destacou-se pela maior consistência das correlações, confirmando evidências da literatura que apontam a fase de formação de legumes como estratégica para o monitoramento espectral, devido ao elevado vigor vegetativo, máxima intercepção de radiação solar e início da definição do potencial produtivo. Esse resultado reforça o papel do estádio R4 como referência para decisões de manejo baseadas em sensoriamento remoto.

No talhão Barragem, as correlações foram baixas e dispersas, com destaque para NDVI e GNDVI em R5 e NDMI em R7. Esse comportamento sugere maior heterogeneidade espacial, influenciada por condições edáficas, microclimáticas e práticas de manejo, ressaltando a necessidade de considerar especificidades locais na aplicação do sensoriamento remoto. Assim, o segundo objetivo foi contemplado, uma vez que a comparação entre os dois talhões evidenciou diferenças relacionadas à variabilidade espacial e ao manejo, apontando implicações distintas na Agricultura Preditiva.

Embora os resultados corroborem com estudos anteriores, algumas limitações devem ser reconhecidas, como a resolução espacial do Sentinel-2, que pode não capturar variações em microescala, e a análise restrita a uma única safra. Tais limitações indicam que séries

temporais mais longas, múltiplas condições edafoclimáticas e a integração com sensores de maior resolução são fundamentais para consolidar o entendimento dos estádios fenológicos mais sensíveis, fortalecendo o terceiro objetivo do estudo. Recomenda-se, portanto, a ampliação para séries temporais mais longas, múltiplas condições edafoclimáticas e integração com sensores de maior resolução e dados proximais, aliados a modelos de crescimento de culturas e variáveis biofísicas do solo.

Conclui-se que, a integração entre índices espectrais e mapas de produtividade representa uma abordagem promissora para o fortalecimento da Agricultura de Precisão e Digital, contribuindo para maior sustentabilidade no cultivo da soja e reforçando a competitividade do Brasil no mercado global de grãos.

REFERÊNCIAS

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja** – Região Central do Brasil 2013. Londrina: Embrapa.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 11 p. (Special Report, 80).

Fontana DC, Pinto DG, Junges AH, Bremm C. Inferências sobre o calendário agrícola a partir de perfis temporais de NDVI/MODIS. **Bragança** [Internet]. Julho de 2015;74(3):350–8. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1678-4499.0439

GAO, B. C. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257–266, 1996.

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N.; LICHTENTHALER, H. K. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. **Journal of Plant Physiology**, v. 148, p. 501–508, 1996.

HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; TREMBLAY, N.; ZARCO-TEJADA, P. J.; DEXTRAZE, L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 2-3, p. 416-426, 2002.

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. **Banco de Dados Meteorológicos, 2025**. Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/. Acesso em: 02 set. 2025.

MOLIN, José Paulo; AMARAL, Lucas Rios do; COLAÇO, André Freitas. **Agricultura de precisão**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. ISBN 978-85-7975-213-1.

PEREIRA, G.W.; VALENTE, D.S.M.; QUEIROZ, D.M.d.; COELHO, A.L.d.F.; COSTA, M.M.; GRIFT, T. Smart-Map: An open-source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging. **Agronomy**, v.12, n.6: 1350, 2022.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. ***Third ERTS Symposium***, NASA SP-351, v. 1, p. 309–317, 1973.

ISBN 978-65-990392-6-3

TRINDADE, F. S.; ALVES, M. C.; NOETZOLD, R.; ANDRADE, I. C.; POZZA, A. A. A. Relação espectro-temporal de índices de vegetação com atributos do solo e produtividade da soja. **Revista de Ciências Agrárias** [Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences], Belém, v. 62, p. 1–11, mar. 2019.

Tschiedel M, Ferreira MF. INTRODUÇÃO À AGRICULTURA DE PRECISÃO: CONCEITOS E VANTAGENS. **Ciência Rural** [Internet]. 2002Fevereiro;32(1):159–63. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0103-84782002000100027

SECRETARIA DO PLANEJAMENTO, GOVERNANÇA E GESTÃO DO RIO GRANDE DO SUL. **Clima, Temperatura e Precipitação**. Disponível em: https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/clima-temperatura-e-precipitacao. Acesso em: 13 set. 2025.

CAPÍTULO 65

CORRELAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO (NDVI E IOP) PARA O MONITORAMENTO DO DOSSEL VEGETATIVO DO TRIGO

Correlation between vegetation indices (NDVI and IOP) for monitoring wheat development

Thiago Santos Cocco[1]; Anna Elisa Gatelli[1]; Thauhana Kuhn[1]; Márcio Gabriel Motke Wrubleski[1]; Luís Felipe Rossetto Gerlach[2]; André Luis Vian[3]; Christian Bredemeier[3]

[1] Graduando em agronomia na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 7712, 91540000, Porto Alegre – RS, Brasil, agro.thiagoscocco@gmail.com, annagatelli@hotmail.com, thauhanakuhn@gmail.com, wrubleskimarcio@gmail.com

[2] Doutorando em agronomia na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 7712, 91540000, Porto Alegre – RS, Brasil, lfelipeross@hotmail.com

[3] Professor do departamento de Plantas de Lavoura , Av. Bento Gonçalves, 7712, 91540000, Porto Alegre – RS, Brasil, andre.vian@ufrgs.br, cristian.bredemeier@ufrgs.br

RESUMO

O trigo é uma das principais culturas de importância econômica no Brasil, especialmente no Rio Grande do Sul. O monitoramento do desenvolvimento da lavoura é fundamental para otimizar o manejo, e índices de vegetação se destacam nesse processo. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é amplamente utilizado, mas apresenta limitações em fases iniciais, pelo solo exposto, e finais, pela senescência e saturação. Como alternativa, surge o Índice de Ocupação de Plantas (IOP), obtido a partir de imagens digitais, de baixo custo e sem restrições relacionadas à saturação. Este trabalho avaliou a evolução de NDVI e IOP em diferentes estádios fenológicos do trigo e analisou a correlação entre ambos. Os resultados mostraram que os dois índices acompanharam de forma consistente a cultura, com maior destaque para V9 e espigamento, fases de máxima área fotossinteticamente ativa. A correlação foi significativa em todos os estádios, confirmando o potencial do IOP como ferramenta alternativa ou complementar ao NDVI no monitoramento agrícola.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, Cobertura vegetal, NDVI.

ABSTRACT

Wheat is one of the main crops of economic importance in Brazil, especially in Rio Grande do Sul. Monitoring crop development is essential to optimize management, and vegetation indices stand out in this process. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is widely used but has limitations in early stages, due to exposed soil, and in later stages, due to senescence and saturation. As an alternative, the Plant Occupancy Index (IOP), obtained from digital images, is low-cost and free from saturation restrictions. This study evaluated the evolution of NDVI and IOP in different phenological stages of wheat and analyzed their correlation. Results showed that both indices consistently followed crop development, with greater emphasis on V9 and heading, stages of maximum photosynthetically

ISBN 978-65-990392-6-3

active area. Correlation was significant at all stages, confirming the potential of IOP as an alternative or complementary tool to NDVI in crop monitoring.

Keywords: remote sensing, vegetation cover, precision agriculture.

1 INTRODUÇÃO

O trigo é uma das principais culturas alimentares cultivadas em diversas regiões do mundo, desempenhando papel fundamental na segurança alimentar global e sendo a base da dieta de grande parte da população. Além da sua relevância como fonte de energia e proteína vegetal, destaca-se pela ampla utilização industrial. No Brasil, o cereal assume importância crescente não apenas pelo consumo interno, mas também pela possibilidade de reduzir a dependência de importações e fortalecer a cadeia produtiva nacional (CUNHA; SILVA, 2019). No Rio Grande do Sul, segundo maior produtor do país, a cultura ocupa posição importante dentro dos sistemas de rotação e sucessão de culturas, especialmente pela integração com a soja e o milho. Na safra de 2024, o estado alcançou um total de 1,3 milhões de hectares cultivados, com produtividade média de 2,8 toneladas por hectare (VENSKE et al., 2024), consolidando-se como polo fundamental para o abastecimento interno e para o desenvolvimento econômico regional.

O desenvolvimento do trigo está diretamente associado à sua capacidade fotossintética e ao acúmulo de fotoassimilados ao longo do ciclo. Esse processo depende da manutenção da área foliar ativa, responsável por interceptar a radiação solar e transformá-la em energia para o crescimento e enchimento de grãos (TAIZ; ZEIGER, 2017). Alterações fisiológicas, como expansão foliar, senescência ou perda de vigor, modificam a reflectância da radiação eletromagnética emitida ou refletida pela planta, tornando possível o monitoramento de seu estado por meio de sensores. Dessa forma, características como a coloração, o índice de área foliar e a densidade do dossel vegetativo atuam como indicadores naturais que viabilizam a utilização de técnicas de sensoriamento remoto.

Nesse cenário, torna-se indispensável o estudo dos fatores que condicionam o desempenho agronômico da cultura, especialmente em regiões como o Rio Grande do Sul e Paraná, onde o trigo desempenha papel estratégico na rotação de culturas e na sustentabilidade dos sistemas de cultivo, além de garantir segurança alimentar (DE BONA et al., 2016). O monitoramento adequado do desenvolvimento da lavoura permite não apenas orientar práticas de manejo mais assertivas, mas também reduzir riscos associados a variações climáticas e à disponibilidade de nutrientes. Nesse sentido, o uso de ferramentas tecnológicas, como o sensoriamento remoto e os índices de vegetação, tem se consolidado como alternativa eficiente para avaliar, em tempo real, o vigor da cultura e subsidiar a tomada de decisão no campo (BOSCHINI, 2010; CUNHA; SILVA, 2019).

Entre as ferramentas disponíveis para esse fim, o sensoriamento remoto tem se consolidado como uma das mais promissoras para o monitoramento agrícola. Essa tecnologia conecta as demandas geradas a campo com recursos capazes de registrar e analisar a resposta das plantas em diferentes estádios de desenvolvimento, permitindo maior assertividade nas decisões de manejo. O uso de satélites, drones e sensores de campo possibilita a coleta de dados em larga escala e com boa frequência temporal, ampliando a capacidade de acompanhamento do crescimento vegetativo e da eficiência do uso de insumos. Além disso, o sensoriamento remoto oferece suporte, desde que associado a outros dados, ao aumento da produtividade, à melhoria do manejo da adubação e à

ISBN 978-65-990392-6-3

sustentabilidade da lavoura, aspectos que vêm ganhando destaque em programas de pesquisa agrícola.

Um dos índices mais utilizados nesse contexto é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que fornece uma estimativa indireta do vigor vegetativo das plantas com base na reflectância da radiação no vermelho e no infravermelho próximo. O NDVI tem sido amplamente empregado para monitorar o desenvolvimento de culturas como o trigo, especialmente por sua capacidade de indicar padrões de crescimento, cobertura do solo e, em alguns casos, prever produtividade (RANSON et al., 2003; XUE; SU, 2017). Sua aplicação prática permite acompanhar a evolução da área fotossinteticamente ativa da lavoura ao longo do ciclo, possibilitando identificar focos de maior demanda nutricional, períodos de estresse e até estimativas de rendimento. Consiste em uma métrica relativamente simples, que pode ser adquirida tanto via satélite quanto por sensores de proximidade, sendo empregada amplamente em diferentes culturas.

Há também métodos de análise de imagens RGB convencionais, que têm sido utilizados como alternativa para estimar a cobertura vegetal de forma direta a partir de fotografias digitais. Essa abordagem baseia-se na classificação dos pixels da imagem em categorias como solo, palha e vegetação, permitindo quantificar a proporção da área ocupada por plantas verdes. O Índice de Ocupação de Plantas (IOP) surge nesse contexto como um indicador simples e objetivo, capaz de refletir o desenvolvimento da cultura ao longo de seus estádios fenológicos. Por depender apenas de imagens no espectro visível, obtidas por câmeras convencionais, o IOP apresenta grande aplicabilidade em campo e pode ser uma alternativa de baixo custo a sensores proximais de NDVI, tornando-se uma ferramenta acessível tanto em pesquisas quanto em atividades de monitoramento agrícola.

Diante deste cenário, o objetivo do trabalho foi desenvolver um modelo que correlaciona os dois índices, índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e índice de ocupação de plantas (IOP) a fim de entender a dinâmica e a relação entre os índices.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA-UFRGS), localizada no município de Eldorado do Sul – RS. O clima da região é classificado como subtropical úmido (Cfa), segundo Köppen, caracterizado por verões quentes e invernos amenos. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.440 mm, com distribuição relativamente uniforme ao longo do ano, enquanto a temperatura média mensal varia entre 14 °C e 25 °C (Bergamaschi et al., 2003). Segundo a classificação proposta por Streck et al. (2008), o solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico Típico.

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos a partir de experimentos conduzidos ao longo de múltiplas safras (2016, 2017, 2018, 2019 e 2020). Em todos os anos, foram avaliados diferentes tratamentos relacionados às doses de adubação nitrogenada em cobertura, com o intuito de gerar variabilidade no desenvolvimento das plantas e, consequentemente, permitir maior amplitude na análise dos índices de vegetação. As

ISBN 978-65-990392-6-3

parcelas experimentais foram conduzidas sob condições controladas de manejo e dentro dos padrões técnicos recomendados para a cultura do trigo.

As medições do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foram realizadas utilizando-se um sensor óptico ativo portátil Greenseeker. As leituras foram feitas a 1 metro acima do dossel das plantas, em diferentes estádios fenológicos do trigo, desde o início do desenvolvimento vegetativo (V3) até o enchimento de grãos e estágio de grão leitoso (Haun, 1973). O Greenseeker emite radiação nas faixas do vermelho e do infravermelho próximo, permitindo o cálculo do NDVI de forma imediata e em campo. Para cada parcela, foi considerada uma média representativa das leituras obtidas em pontos distintos, garantindo a padronização e a representatividade da área experimental.

Para as análises de IOP foram coletadas imagens digitais da cultura utilizando-se uma câmera Sony Cyber-shot, com espectro de captura no visível (400–700 nm). As fotografias foram obtidas em condições de luz uniforme, buscando reduzir interferências de sombra e variações de luminosidade. O enquadramento foi padronizado, com a câmera posicionada a 1 metro acima do dossel, de modo a abranger a maior parte da superfície das parcelas.

As imagens foram posteriormente processadas para classificação dos pixels em três categorias principais: vegetação verde, solo e palha. A partir dessa segmentação, foi estimada a porcentagem da área ocupada por vegetação, que corresponde ao Índice de Ocupação de Plantas (IOP). Esse índice reflete diretamente a cobertura vegetal da cultura em cada estádio fenológico, permitindo acompanhar a evolução do dossel ao longo do ciclo do trigo.

Foi então feito o uso do software SISCOB, desenvolvido pela Embrapa, que tem como objetivo padronizar e facilitar a coleta de dados de campo relacionados ao desenvolvimento das culturas. O sistema permite registrar informações fenológicas, agronômicas e ambientais de maneira organizada, além de gerar relatórios e análises consistentes para acompanhamento do crescimento das plantas. A integração entre os dados obtidos por sensoriamento remoto (como os índices NDVI e IOP) e os registros feitos no SISCOB potencializa o monitoramento do trigo, pois combina observações em escala de área com dados detalhados de campo, resultando em uma avaliação mais precisa e robusta do dossel ao longo do ciclo da cultura.

Os valores de NDVI e IOP foram organizados em banco de dados e submetidos a análises estatísticas no software R (R Core Team, 2020). Foi calculado o coeficiente de correlação linear de Pearson entre as duas variáveis para cada estádio fenológico, com nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Além disso, foram ajustados modelos de regressão linear simples para a visualização das tendências e da força da relação entre os índices ao longo do ciclo. Buscou-se assim combinar as medições de NDVI, obtidas por sensor óptico ativo, e as estimativas de cobertura vegetal derivadas do IOP, a partir de imagens digitais. Essa abordagem fornece condições adequadas para avaliar a correlação entre os dois índices de vegetação, atendendo ao objetivo central do trabalho de investigar a viabilidade do IOP como alternativa ou complemento ao NDVI no monitoramento do desenvolvimento da cultura.

ISBN 978-65-990392-6-3

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de NDVI obtidos pelo equipamento greenseeker® ao longo dos estádios fenológicos do trigo apresentaram comportamento característico da evolução da cultura. Nos estádios iniciais, como V3 e V6, o índice apresentou valores intermediários, influenciados pela presença de solo exposto, que reduz a sensibilidade da resposta espectral. Ainda assim, o NDVI foi capaz de captar o avanço do desenvolvimento vegetativo, indicando o início do fechamento do dossel.

O maior desempenho do índice foi observado no estádio V9 e no espigamento, quando a cultura apresentou plena cobertura do solo e máxima área foliar ativa. Nessas fases, os valores médios de NDVI atingiram os maiores patamares, em consequência do elevado vigor vegetativo e da eficiência fotossintética das plantas. Esses resultados confirmam o potencial do NDVI como indicador da condição da cultura em momentos de máxima demanda nutricional e crescimento, além de corroborarem estudos prévios que apontam forte associação entre o índice e o acúmulo de fotoassimilados.

Os estádios de florescimento e grão leitoso, o NDVI apresentou redução nos valores médios, essa diminuição é explicada pela senescência natural da planta e pelas mudanças de coloração foliar, que modificam o padrão de reflectância da radiação. Dessa forma, os resultados indicam que, embora o NDVI seja eficiente em expressar a evolução do crescimento e o vigor do trigo em estádios intermediários, sua capacidade de representar a cultura diminui em fases iniciais, devido ao solo exposto, e em fases finais, em virtude do processo de maturação e senescência.

É importante destacar também que o NDVI apresenta tendência à saturação em estádios de dossel fechado. Isso significa que, a partir de certo ponto (V9 e espigamento na pesquisa realizada), aumentos adicionais na biomassa ou na densidade foliar não se refletem em incrementos expressivos do índice. Essa limitação é particularmente observada em fases como o espigamento, quando o NDVI atinge valores próximos ao limite máximo de resposta e perde parte da sua sensibilidade para discriminar diferenças sutis no crescimento entre tratamentos ou genótipos.

A Figura 1 apresenta a evolução dos valores médios de NDVI obtidos nos diferentes estádios fenológicos do trigo. Observa-se aumento progressivo do índice desde o início do ciclo, com valores de 0,42 em V3 e 0,52 em V6, até atingir patamares mais elevados a partir do estádio V7–V8 (0,75). O valor máximo foi registrado no espigamento (0,79), fase em que a cultura apresentou maior área foliar ativa e plena cobertura do solo.

Após esse ponto, nota-se estabilização dos valores durante o florescimento (0,76) e pleno florescimento (0,76), seguida de queda acentuada no enchimento de grãos (0,52), explicada pelo início da senescência foliar. No estádio de grão leitoso, o NDVI apresentou leve recuperação (0,57), embora ainda inferior aos valores máximos observados anteriormente. Esses resultados confirmam o comportamento típico do índice, que responde positivamente ao vigor vegetativo da cultura até o fechamento do dossel, reduzindo gradualmente sua sensibilidade à medida que avançam os processos de maturação e senescência.

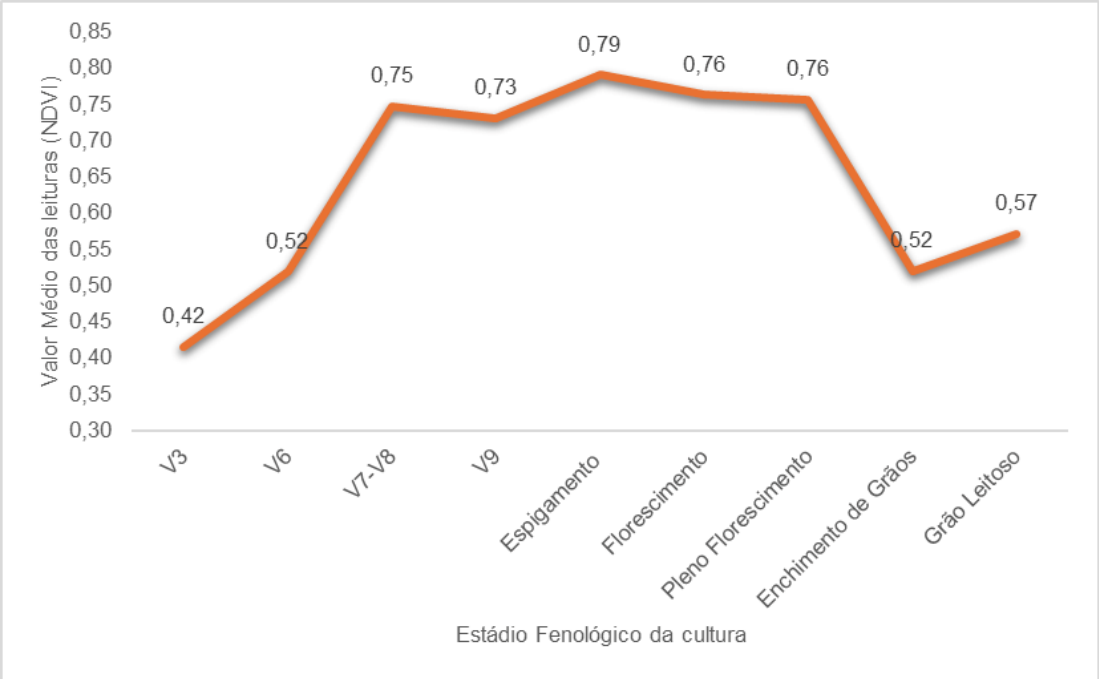
A evolução da cultura do trigo ao longo dos principais estádios fenológicos, associando as imagens reais da lavoura aos valores médios de NDVI. Nota-se que nos

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque/RS · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

estádios iniciais a presença de solo e palha expostos é evidente, enquanto nos estádios intermediários observa-se o fechamento do dossel e a máxima expressão da área foliar ativa. Nos estádios finais, as imagens evidenciam o início da senescência e a perda gradual da coloração verde, aspectos que explicam a redução do índice espectral. Assim, a figura complementa os resultados numéricos, permitindo visualizar de forma prática como as alterações fisiológicas da cultura se refletem nos valores de NDVI ao longo do ciclo.

Figura 1 - Valores médios de NDVI ao longo dos estádios fenológicos do trigo.



Fonte: Autores (2025)

Embora o NDVI tenha se mostrado eficiente para caracterizar o vigor vegetativo do trigo, sua interpretação pode ser limitada em determinadas fases do ciclo, como nos estádios iniciais e finais, ou em situações de saturação do índice após o fechamento do dossel. Visto isso, surge a necessidade de explorar métodos complementares que permitam avaliar a cobertura vegetal por diferentes abordagens. Entre esses, destaca-se o IOP, obtido a partir de imagens digitais no espectro visível. Esse indicador, apresentado na sequência, possibilita a quantificação direta da área ocupada por plantas verdes, funcionando como alternativa prática e de baixo custo ao uso de sensores específicos, além de ampliar as ferramentas disponíveis para o monitoramento agrícola (figura 2).

Os valores de IOP obtidos a partir de imagens RGB refletiram de forma direta a evolução da cobertura vegetal do trigo ao longo dos estádios fenológicos. Nos estádios iniciais (V3 e V6), as imagens evidenciaram grande proporção de solo e palha expostos, resultando em valores reduzidos de IOP. Essa limitação, no entanto, não comprometeu a capacidade do IOP de detectar o avanço da cultura, já que foi possível identificar o progressivo aumento da área ocupada por plantas até o fechamento do dossel.

O maior desempenho do IOP foi observado no estádio V9 e no espigamento, quando a cultura apresentou plena cobertura do solo e máxima densidade foliar. Nesses estádios, assim como o NDVI, o índice refletiu com clareza o vigor vegetativo, demonstrando elevada

ISBN 978-65-990392-6-3

sensibilidade às alterações visuais da lavoura. Essa resposta confirma o potencial do IOP para representar de maneira objetiva o desenvolvimento da cultura, principalmente em fases de maior acúmulo de biomassa e atividade fotossintética. Nos estádios seguintes, de florescimento até grão leitoso, o IOP apresentou redução gradual dos valores, acompanhando a senescência das plantas e a perda da coloração verde característica da vegetação ativa. Essa diminuição se deve à substituição da tonalidade verde por tons amarelados nas folhas e colmos, o que reduz a proporção de pixels classificados como vegetação.

Figura 2 - Imagens representativas da cultura do trigo em diferentes estádios fenológicos, acompanhadas dos valores médios de NDVI.



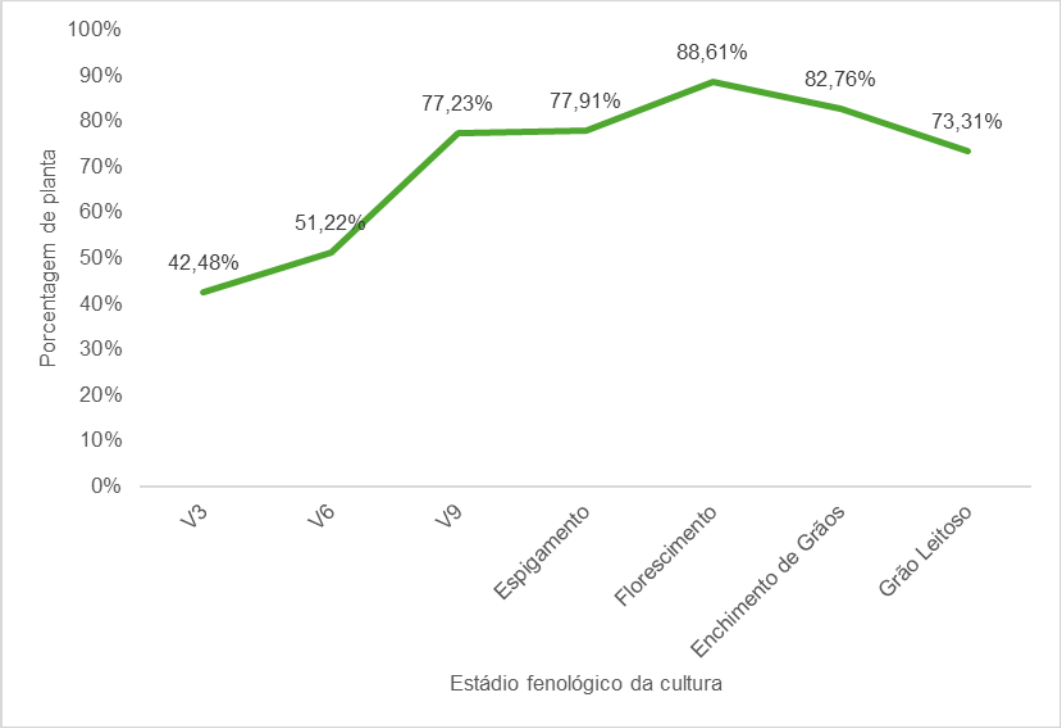
Fonte: Autores (2025)

É importante destacar que, diferentemente do NDVI, o IOP não sofre com a saturação em estádios de dossel fechado, já que sua estimativa é baseada na classificação visual da área ocupada pelas plantas. Essa característica confere ao índice maior capacidade de discriminar diferenças sutis de cobertura mesmo em fases de elevada densidade foliar, tornando-o uma ferramenta promissora para complementar ou substituir métodos espectrais em determinadas situações de campo.

A evolução dos valores médios de IOP ao longo dos estádios fenológicos do trigo está apresentada na Figura 3. Observa-se que o índice acompanhou de maneira consistente o desenvolvimento da cultura, refletindo o aumento progressivo da cobertura vegetal desde os estádios iniciais até alcançar o ponto máximo no florescimento. Posteriormente, os valores decresceram de forma gradual, acompanhando o avanço da maturação e a senescência das plantas. Esses resultados confirmam a sensibilidade do IOP em expressar as mudanças visuais da lavoura ao longo do ciclo, tornando-o uma ferramenta útil para o monitoramento da cultura.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 3 – Valores médios do Índice de Ocupação de Plantas (IOP) obtidos nos diferentes estádios fenológicos do trigo.



Fonte: Autores (2025)

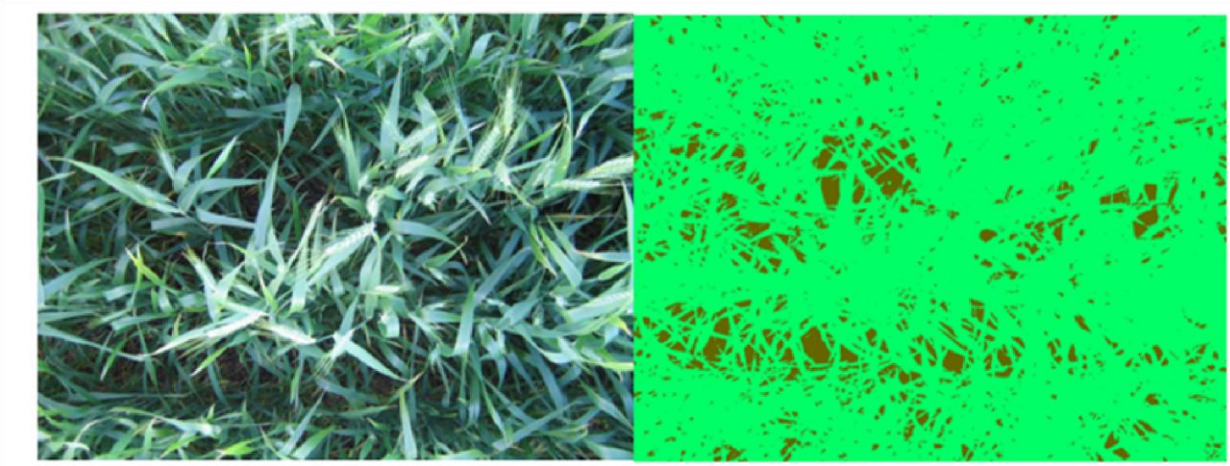
Já a Figura 4 apresenta um exemplo visual do processo de obtenção do Índice de Ocupação de Plantas (IOP). À esquerda, observa-se a imagem original da área de trigo no estádio de florescimento, evidenciando a elevada densidade foliar característica dessa fase. À direita, a mesma imagem aparece processada por segmentação no software SISCOB, em que os pixels foram classificados e destacados em verde, representando a fração da área ocupada pela vegetação. Esse procedimento permitiu quantificar de forma objetiva a cobertura vegetal, traduzindo informações visuais em dados numéricos utilizados para a análise do IOP ao longo dos diferentes estádios fenológicos da cultura.

A análise isolada IOP, assim como do NDVI anteriormente, mostra que ambos os índices foram sensíveis às mudanças fisiológicas da cultura ao longo do ciclo, ainda que com diferentes limitações e vantagens. Considerando que o NDVI se baseia em propriedades espectrais e o IOP em características visuais da cobertura vegetal, torna-se fundamental avaliar a relação entre esses dois indicadores. A correlação entre eles permite verificar em que medida o IOP, obtido por meio de imagens digitais de baixo custo, pode reproduzir padrões semelhantes aos detectados pelo NDVI, ampliando as alternativas disponíveis para o monitoramento da cultura.

A correlação entre os valores de NDVI e IOP apresentou resultados consistentes ao longo dos diferentes estádios fenológicos do trigo, confirmando que ambos os índices captam de forma semelhante a evolução da cobertura vegetal da cultura. Os coeficientes de correlação de Pearson foram estatisticamente significativos em todos os estádios avaliados, variando de valores moderados a muito fortes, o que evidencia a complementaridade entre os dois métodos de detecção.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 4 – Foto da área de trigo em florescimento (esquerda) e sua imagem processada no SISCOB (direita).



Fonte: Autores (2025)

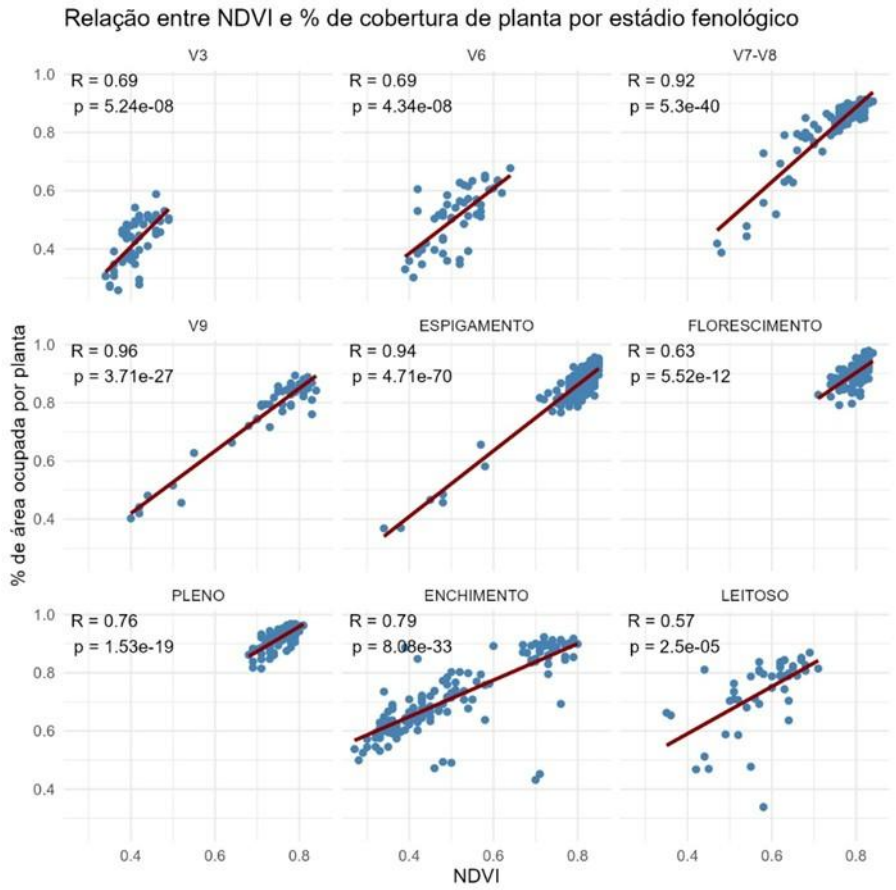
Os maiores coeficientes foram observados nos estádios V9 e espigamento, com valores próximos a 0,96, indicando elevada correspondência entre os índices em fases de pleno desenvolvimento da cultura e máxima cobertura do solo. Esse comportamento é explicado pela maior homogeneidade da vegetação e pela predominância da área foliar ativa, que favorecem tanto a reflectância no infravermelho próximo, captada pelo NDVI, quanto a classificação visual de pixels verdes utilizada no IOP.

Por outro lado, os menores valores de correlação foram registrados nos estádios de florescimento e grão leitoso, com coeficientes variando de 0,57 a 0,63. Nessas fases, a presença de solo exposto nos estádios iniciais ou o avanço da senescência nos estádios finais reduzem a precisão, principalmente do NDVI, e consequentemente a associação entre os índices. No caso do grão leitoso, a alteração da coloração das plantas para tons amarelados impacta diretamente o IOP, ao mesmo tempo em que o NDVI perde sensibilidade devido à diminuição da reflectância no infravermelho próximo.

A Figura 5 apresenta a relação entre os valores de NDVI e o percentual de cobertura de plantas (IOP) para cada estádio fenológico do trigo, sendo possível observar que, em todos os estádios, a tendência linear entre os índices foi significativa, ainda que com diferentes intensidades. Em fases de maior desenvolvimento vegetativo, como V9 e espigamento, a proximidade entre os pontos e a inclinação da reta de regressão evidenciam a forte correspondência entre os métodos.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 5 – Relação entre NDVI e Índice de Ocupação de Plantas (IOP) nos diferentes estádios fenológicos do trigo.



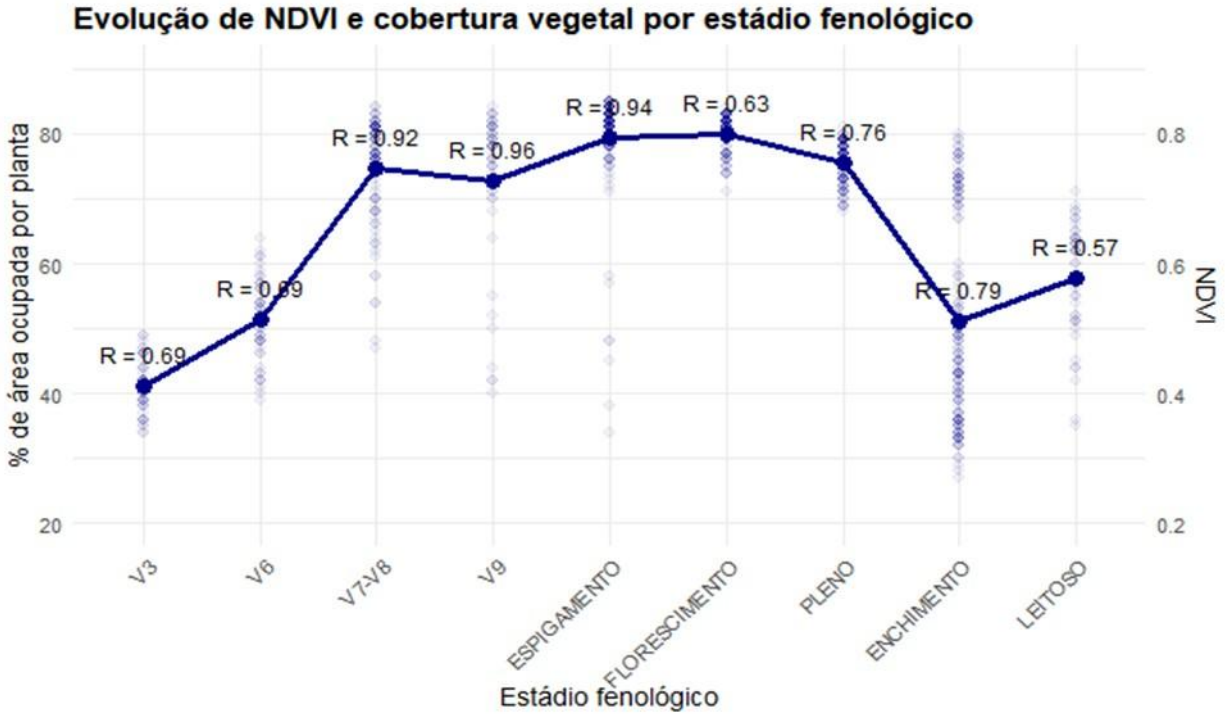
Fonte: Autores (2025)

A Figura 6 complementa a análise ao apresentar a evolução conjunta dos valores médios de NDVI e do IOP ao longo dos estádios fenológicos do trigo. Nota-se que ambos os índices acompanharam de maneira semelhante o desenvolvimento da cultura, com aumento progressivo desde os estádios iniciais até atingir os valores mais elevados em V9 e espigamento, seguido por estabilização e posterior declínio nas fases de enchimento de grãos e grão leitoso. Essa tendência reforça a consistência dos resultados e confirma que, apesar de serem obtidos por metodologias distintas, NDVI e IOP expressam de forma convergente o comportamento da cobertura vegetal ao longo do ciclo do trigo.

De maneira geral, os resultados obtidos confirmam que tanto o NDVI quanto o IOP acompanharam a evolução fenológica do trigo, refletindo as alterações fisiológicas da cultura ao longo do ciclo. Enquanto o NDVI apresentou elevada sensibilidade em fases de máximo vigor, mas limitou-se pela saturação em dosséis fechados, o IOP mostrou-se eficiente inclusive nessas condições, reforçando seu potencial como ferramenta prática e acessível. A forte correlação observada entre os dois índices, especialmente nos estádios de maior cobertura vegetal, evidencia que o IOP pode atuar como alternativa ou complemento ao NDVI no monitoramento agrícola. Essa convergência entre métodos distintos amplia as possibilidades de uso de indicadores de vegetação para subsidiar o manejo da cultura e contribuir para avanços na agricultura de precisão.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 6 – Evolução dos valores médios de NDVI e Índice de Ocupação de Plantas (IOP) nos diferentes estádios fenológicos do trigo.



Fonte: Autores (2025)

Os resultados mostram que tanto o NDVI quanto o IOP acompanharam a evolução fenológica do trigo, no entanto, a simples apresentação das curvas de variação dos índices ao longo do ciclo não é suficiente para compreender a dinâmica fisiológica da cultura. Torna-se necessário discutir em que medida esses padrões refletem processos biológicos, limitações metodológicas e implicações práticas para o manejo.

A forte evidente correlação observada entre NDVI e IOP em estádios intermediários, especialmente em V9 e no espigamento, está diretamente associada à máxima área fotossinteticamente ativa e ao fechamento completo do dossel. Nesses estágios, a homogeneidade da vegetação favorece tanto a resposta espectral captada pelo sensor óptico quanto a estimativa visual de cobertura derivada das imagens RGB, o que explica os elevados coeficientes de correlação (R > 0,90). Esses achados corroboram estudos de Povh et al. (2008), que também identificaram maior sensibilidade dos índices espectrais durante fases de intenso crescimento vegetativo.

Já nos estádios iniciais, a presença de solo exposto reduziu a acurácia do NDVI, que depende da diferença de reflectância entre as bandas do vermelho e infravermelho próximo. Esse comportamento já havia sido relatado por Jones e Vaughan (2010), que destacaram a interferência do fundo do solo em culturas pouco desenvolvidas. Apesar disso, o IOP mostrou-se eficiente em detectar o aumento progressivo da cobertura vegetal, indicando que pode atuar como indicador mais robusto em condições de baixa biomassa inicial.

Nos estádios finais, como florescimento e grão leitoso, ambos os índices apresentaram declínio, mas por razões distintas. No caso do NDVI, a senescência e a mudança na coloração

ISBN 978-65-990392-6-3

das folhas reduzem a refletância no infravermelho próximo, comprometendo a sensibilidade do índice (RANSON et al., 2003). Já o IOP, baseado em segmentação visual, sofreu influência direta da tonalidade amarelada da vegetação, resultando em menores proporções de pixels classificados como “verde”. Ainda assim, é importante destacar que o IOP não apresentou problemas de saturação em dosséis densos, uma limitação clássica do NDVI (XUE; SU, 2017). Esse contraste indica que os dois índices são complementares: enquanto o NDVI fornece informações indiretas sobre o vigor fotossintético, o IOP reflete de forma objetiva a fração de solo coberta por plantas, mesmo em condições de elevada biomassa.

Do ponto de vista agronômico, esses resultados reforçam a importância da integração de diferentes ferramentas de monitoramento. Em situações de campo, produtores e técnicos podem se beneficiar do uso do IOP como alternativa de baixo custo ao NDVI, utilizando câmeras convencionais para estimar a cobertura do solo em diferentes fases da cultura. Em contrapartida, o NDVI continua sendo uma métrica consolidada para avaliar a resposta espectral e a fisiologia das plantas, especialmente quando aliado a plataformas de sensoriamento remoto em escala regional. A adoção conjunta desses índices tem potencial de ampliar a assertividade nas recomendações de manejo de nitrogênio, na identificação de estresses bióticos ou abióticos e na validação de cultivares (EMBRAPA TRIGO, 2021).

Entretanto, algumas limitações precisam ser reconhecidas. A variabilidade climática entre safras pode alterar o comportamento espectral da cultura, exigindo cautela na extrapolação dos resultados. Além disso, o processamento manual das imagens no software SISCOB, embora eficiente, pode demandar tempo e estar sujeito a subjetividade do avaliador. Nesse sentido, a automatização da classificação de pixels e o uso de algoritmos de aprendizado de máquina podem representar avanços futuros para aumentar a precisão e reduzir custos de processamento.

4 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que os índices de vegetação NDVI e IOP foram eficientes para acompanhar a evolução fenológica da cultura do trigo, refletindo as principais mudanças fisiológicas ocorridas ao longo do ciclo. O NDVI destacou-se por sua ampla utilização e pela sensibilidade em identificar estádios de maior vigor vegetativo, especialmente V9 e espigamento. No entanto, apresentou limitações em fases iniciais, pela influência do solo exposto, e em fases finais, em decorrência da senescência e da saturação em dosséis fechados.

O IOP, por sua vez, mostrou-se um método capaz de quantificar de maneira direta a cobertura vegetal a partir de imagens digitais, mais acessíveis e de baixo custo, além de acompanhar com precisão o desenvolvimento da cultura, o índice não apresentou restrições relacionadas à saturação, oferecendo maior sensibilidade para discriminar diferenças sutis de cobertura mesmo em condições de elevada densidade foliar.

A forte correlação entre os dois índices em todos os estádios avaliados, com destaque para os estádios V9 e espigamento, fases em que a cultura apresenta sua maior área fotossinteticamente ativa, confirma o potencial do IOP como alternativa ou complemento ao NDVI no monitoramento do trigo.

Dessa forma, conclui-se que o uso integrado de NDVI e IOP pode contribuir para a tomada de decisão no manejo do trigo, possibilitando melhor acompanhamento do desenvolvimento da lavoura e avanços no monitoramento agrícola em diferentes condições de cultivo. No entanto, ressalta-se a necessidade da realização de novos estudos que aprofundem a avaliação da relação entre esses índices, de forma a consolidar sua aplicabilidade em diferentes ambientes e sistemas de manejo.

REFERÊNCIAS

BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M. R.; CARDOSO, L. S.; SILVA, M. I. G. **Clima da Estação Experimental da UFRGS (Eldorado do Sul)**. Porto Alegre: UFRGS, 2003.

BOSCHINI, A. Nitrogênio na cultura do trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 601-610, 2010.

CUNHA, G. R.; SILVA, M. S. Adubação e manejo do trigo no Brasil: avanços e desafios. **Revista Brasileira de Agronomia**, Brasília, v. 25, n. 3, p. 45-58, 2019.

DE BONA, F. D.; et al. Nitrogênio no trigo: resposta em rendimento e qualidade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 12, p. 1627-1636, 2016.

EMBRAPA TRIGO. **Monitoramento da cultura do trigo: uso de índices de vegetação e sensoriamento remoto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2021.

HAUN, J. R. Visual quantification of wheat development. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, n. 1, p. 116-119, 1973.

JONES, H. G.; VAUGHAN, R. A. **Remote sensing of vegetation**: principles, techniques, and applications. Oxford: Oxford University Press, 2010.

POVH, F. P.; et al. Sensoriamento remoto de três parâmetros agronômicos de trigo e feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 2, p. 227-233, 2008.

RANSON, K. J.; SUN, G.; KIM, J. Using imaging radar to study forest canopy structure and biomass. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 81, n. 2-3, p. 222-231, 2003.

SHEWRY, P. R. Wheat. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 60, n. 6, p. 1537-1553, 2009.

STRECK, E. V.; et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

XUE, J.; SU, B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. **Journal of Sensors**, Cairo, v. 2017, p. 1-17, 2017.

VENSKE, E.; et al. Desemp enho produtivo do trigo em diferentes regiões do Sul do Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 47, n. 2, p. 89-101, 2024.

ISBN 978-65-990392-6-3

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2020. Disponível em: https://www.r-project.org/. Acesso em: 31 ago. 2025.



ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 66

ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO RELACIONADOS AO MANEJO DA CULTURA DO TRIGO

Spectral Vegetation Indices Related to Wheat Crop Management

Lúcio de Paula Amaral[1]; Cristiano Carvalho da Silva[2], Luís Felipe Rech[2]; Nádia Mariane Mucha[2]; Bruna Trevizan Paese[2]; Mateus Santos Ribeiro[3]; Paulo Eugenio Baccin[3]; Alexandre Cordeiro Bueno[3]

[1] Departamento de Engenharia Rural; Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Av. Roraima, nº 1000, Camobi, CEP 97105-900, Santa Maria- RS, Brasil. Email: lucio.amaral@ufsm.br

[2] Departamento de Solos; UFSM. Email: cristiano_csillv@yahoo.com.br; lf.r3ch@gmail.com; muchamariane@gmail.com; brunatpaese@hotmail.com.

[3] Colégio Politécnico; UFSM. Email: mateusribeirotimbauva@hotmail.com; paulobaccin@gmail.com; buenoalexandre.c@gmail.com;

RESUMO

Com o aumento da demanda por alimentos e custos de produção, o setor agrícola necessita de constante atualização. Dessa forma, a agricultura de precisão está sendo decisiva para a tomada de decisões. Dentre seu "know-how" de práticas tem se destacado a utilização de índices de vegetação (IVs) para melhorar o manejo e gestão da lavoura. Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho dos seguintes IVs: NDVI, NDRE, CCCI, PSRI, MSAVI e NDWI na cultura do trigo, no estágio de elongação. Para a obtenção dos IVs foi utilizado um veículo aéreo não tripulado (VANT), equipado com lentes multiespectrais e RGB para geração do ortomosaico de imagens. O processamento das imagens foi realizado no AgisoftMetashape e ArcMap, para confecção dos mapas e valores dos índices. Como resultado, verificou-se que todos os IVs avaliados responderam de forma aceitável às suas proposições. Contudo, sugere-se relacionar esse estudo com a produtividade da cultura, para melhores predições e recomendações dos IVs.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Índice de Vegetação. Manejo do Trigo.

ABSTRACT

Increasing demand for food and rising production costs have made constant innovation essential in the agricultural sector. In this context, precision agriculture has become crucial for effective decision-making. Among its various practices, the use of vegetation indices (VIs) has emerged as a valuable tool to improve crop monitoring and management. This study aims to evaluate the performance of the following VIs: NDVI, NDRE, CCCI, PSRI, MSAVI, and NDWI, on wheat crops during the elongation stage. The indices were derived from images collected by an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) equipped with multispectral and RGB cameras, used to generate an orthomosaic image. Image processing was conducted using Agisoft Metashape and ArcMap to produce maps and extract index values. The results indicated that all evaluated VIs responded adequately to their intended purposes. Nevertheless, future studies should correlate these indices with crop yield to improve prediction accuracy and enhance recommendations.

Keywords: Remote Sensing. Vegetation Indices. Wheat Management.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão tem se consolidado como uma estratégia fundamental para otimizar o manejo de culturas agrícolas, permitindo maior eficiência no uso de insumos e incremento da sustentabilidade produtiva (BERNARDI et al., 2014). Entre as ferramentas mais utilizadas nesse contexto destacam-se os índices espectrais de vegetação (IVs), essenciais para mensurar a variabilidade espacial entre e dentro dos talhões, permitindo identificar áreas com diferentes condições de desenvolvimento das plantas (FORMAGGIO; SANCHES, 2017).

Na cultura do trigo, a detecção precoce de diferenças no vigor vegetativo do dossel das plantas é essencial para estimar a biomassa e produtividade (POVH et al., 2008), o vigor das plantas (KUPLICH et al., 2013; ZDENEK et al., 2017), a avaliação do estádio fenológico (BOSCHETTI et al., 2017) e a análise indireta do estado nutricional e do efeito de fertilizantes (CHRISTENSEN et al., 2005; TILLING et al., 2007).

Nesse cenário, diferentes índices de vegetação espectrais têm sido empregados. O Normalized Difference Vegetation Index (NDVI; índice de vegetação por diferença normalizada) (ROUSE et al., 1973) é amplamente utilizado para avaliar biomassa e vigor (RISSINI et al., 2015), enquanto o Normalized Difference Red Edge Index (NDRE; índice normalizado de diferença na borda vermelha) (SHARMA et al., 2015) apresenta maior sensibilidade a variações de conteúdo de clorofila e ao status nutricional das plantas (KLERING et al., 2016), configurando-se como um complemento ao NDVI em fases específicas do ciclo da cultura. O Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI; índice de conteúdo de clorofila do dossel) possibilita estimar de forma direta a quantidade de clorofila presente na planta (CAMMARANO et al., 2011). O Plant Senescence Reflectance Index (PSRI; índice de reflectância da senescência da planta), baseado nas bandas espectrais do verde, vermelho e borda do vermelho, reflete o teor de carotenóides em relação às clorofilas, sendo útil para monitorar senescência foliar, maturação de frutos, estresse fisiológico e doenças (MERZLYAN et al., 1999; REN; CHEN; AN, 2017). Já o Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI; índice de vegetação ajustado ao solo modificado) aplica um fator de correção variável para minimizar os efeitos do solo exposto na análise da vegetação (FORMAGGIO; SANCHES, 2017). Por fim, o Normalized Difference Water Index (NDWI; índice de água de diferença normalizada) permite o sensoriamento remoto do conteúdo de água líquida na vegetação (FORMAGGIO; SANCHES, 2017), ampliando a compreensão do estado hídrico da cultura.

Dessa forma, estudos comparativos entre esses índices são fundamentais para compreender suas potencialidades e limitações em diferentes fases do ciclo da cultura. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar o desempenho dos índices espectrais NDVI, NDRE, CCCI, PSRI, MSAVI e NDWI na cultura do trigo, analisando sua relação com diferentes atributos da lavoura e sua capacidade explicativa sobre as variabilidades observadas no terreno.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

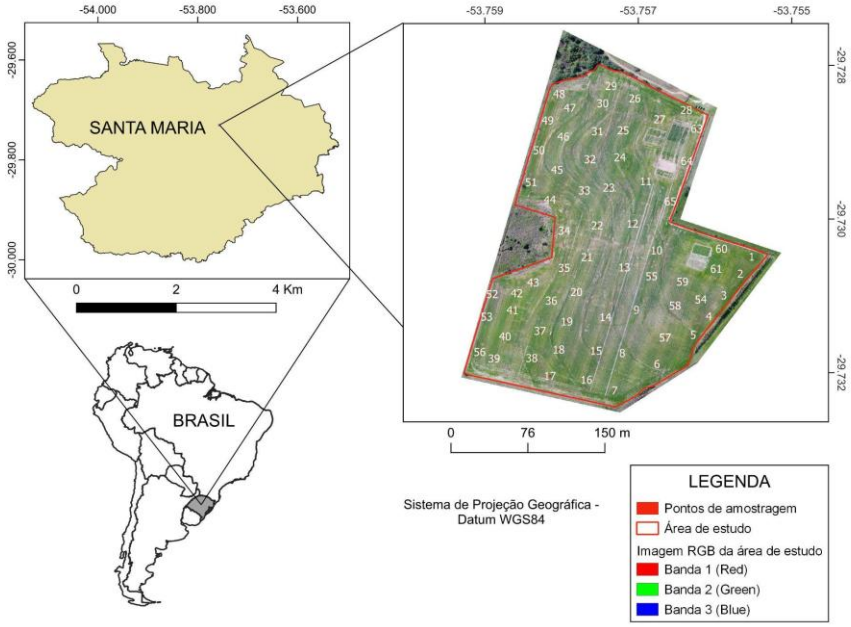
2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido em área experimental de 20 hectares - área de estudo, manejada pelo Setor de Lavouras do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), localizado no Campus Sede da UFSM/Área Experimental - Didática em Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil (coordenadas geográficas: 29°42’ S, 53°45’ O, altitude média de 113 m) (Figura 1). O clima da região, segundo classificação de Köppen, é do tipo), Cfa –

ISBN 978-65-990392-6-3

temperado chuvoso e quente, com nenhuma estação seca, úmido o ano todo, com temperatura média entre 3º C e 18º C no inverno e média superior a 22º C no verão (SANTA MARIA DADOS, 2019), com precipitação média anual em torno de 1.300 mm (INMET, 2024). O solo é caracterizado como Argissolo Bruno acinzentado, textura média, friável e imperfeitamente drenado (SANTOS et al., 2025).

Figura 1 - Localização da área experimental no Campus Sede da UFSM/Área Experimental - Didática em Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.



Fonte: Autores (2025).

A área de estudo foi utilizada para a implantação da cultura do trigo, semeada em 10/06/2025, com uso da cultivar ORS Feroz. A adubação foi realizada conforme recomendação do Manual de Calagem e Adubação RS-SC (CQFS, 2016), com aplicação de 300 kg ha^{-1} de fosfato diamônico (DAP) na adubação de base e 100 kg ha^{-1} uréia em adubação de cobertura. Ao longo do ciclo, os manejos culturais foram realizados conforme a recomendação técnica para a cultura do trigo (RCBPTT, 2023).

As avaliações dos IVs foram realizadas quando o trigo se encontrava no estádio fenológico de elongação. A partir desse estádio ocorre a visualização dos nós no colmo, a planta adquire porte ereto e o primórdio da espigueta eleva-se acima do solo no nó de afilhamento (RODRIGUES et al., 2011). Nesse estádio fenológico ocorre a definição dos componentes de rendimento: número de flores e número de espigas/m² (RODRIGUES, 2000).

2.2 COLETA, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

2.2.1 Coleta dos dados

O monitoramento da cultura do trigo incluiu a aquisição de imagens RGB e multiespectrais, por sensores embarcados em aeronave remotamente pilotada, para o cálculo dos índices espectrais de vegetação. As aquisições de ambos os tipos de imagens foram realizadas no dia 29 de agosto de 2025, no intervalo entre 14h e 14h30min.

ISBN 978-65-990392-6-3

A coleta das imagens foi realizada com uso da Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) DJI Phantom 4 Advanced Plus (possui rádio controle com tela integrada), com o sensor multiespectral Micasense RedEdge-MX embarcado de forma adaptada. A ARP Phantom 4 Advanced Plus possui uma câmera RGB modelo FC6310, distância focal de 8,8 mm, placa geradora da imagem de 5472 x 3648 pixels, tamanho de pixel de 2,41 µm. O plano de voo programado para a ARP foi elaborado no aplicativo Precision Flight versão 2.4.2 instalado no rádio controle, com o qual também foi realizado o voo. Foi utilizado sobreposição lateral de 65%, sobreposição frontal de 75%, altura de voo 80 metros a partir do home point (AGL), com velocidade de 10 m/s. Após o processamento das imagens RGB foi obtido um pixel projetado no terreno (Ground Sample Distance - GSD) de 2,33 cm por pixel.

A obtenção das imagens multiespectrais considerou a altura de voo e a velocidade da ARP para determinar o tempo mínimo de acionamento da câmera RedEdge-MX, que geralmente não deve ser inferior ou igual a um segundo. O tempo de acionamento utilizado para a câmera RedEdge-MX foi de 1,35 segundos. Ao ligar a câmera, ela possibilita conexão wireless, dispõe de IP próprio (<http://192.168.10.254>), login e senha, que possibilita executar no navegador de internet do smartphone/tablet um aplicativo próprio para a sua configuração de funcionamento, pelo qual foi calculado e configurado o tempo de acionamento para obtenção das imagens multiespectrais.

A câmera RedEdge-MX possui cinco bandas espectrais, sendo azul (475 nm com largura de banda de ± 20 nm), verde (560 nm com largura de banda de ±20 nm), vermelho (668 nm com largura de banda de ±10 nm), borda do vermelho (717 nm com largura de borda de ±10 nm) e infravermelho próximo (NIR 840 nm com largura de borda de ±40 nm). Além disso, apresenta distância focal de 5,5 mm, placa geradora da imagem de 1280 x 960 pixels e tamanho de pixel de 3,75 µm. Após o processamento das imagens multiespectrais foi obtido um pixel projetado no terreno (Ground Sample Distance - GSD) de 6,13 cm por pixel.

O sensor dispõe de um painel de calibração de reflectância, e também do Sun Shine Sensor, que registra a variação de luminosidade no momento de aquisição das imagens. Ambos os recursos foram utilizados no processamento das imagens multiespectrais. No momento antes de iniciar o voo foram coletadas imagens do painel de calibração com a câmera multiespectral, disposto sobre o solo, com incidência de luz e sem haver incidência de sombra. O painel de calibração utilizada foi o RP04-1901003-SC (Micasense), que possui os seguintes fatores de calibração para as bandas azul (0.514), verde (0.515), vermelho (0.514), borda do vermelho (0.513) e infravermelho próximo (0.511).

2.2.2 Processamento dos dados

O processamento de ambos os tipos de imagens foi realizado no software Agisoft Metashape Pro versão 2.0.2. No software foram realizadas as seguintes etapas de processamento, inserção das imagens no software, calibração de reflectância para as imagens imagens multiespectrais (painel de calibração + Sun Shine Sensor), alinhamento das imagens com geração da nuvem esparsa de pontos homólogos com processamento em alta qualidade, obtenção da nuvem densa de pontos com processamento em alta qualidade, filtragem de pontos da nuvem densa para a separação dos pontos da superfície do solo, geração do modelo numérico do terreno (MNT) a partir da classe de pontos na superfície do solo, obtenção do ortomosaico das imagens RGB e das bandas multiespectrais.

A partir do ortomosaico obtido foram calculados os índices espectrais de vegetação, com as imagens multiespectrais, para a cultura do trigo (Tabela 1). O ortomosaico das imagens RGB foi obtido para realizar a identificação e aferição de diferentes alvos na área de estudo (plantas de trigo e de outras espécies, solo exposto, palhada, sombra, outros).

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 1 - Os índices espectrais de vegetação utilizados no estudo.

Índices de Vegetação	Equação	Referência
NDVI	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	Rouse et al. (1974)
NDWI	$\frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$	Gao (1996)
NDRE	$\frac{NIR - REDEDGE}{NIR + REDEDGE}$	Barnes et al. (2000)
CCCI	$\frac{NIR - REDEDGE / NIR + REDEDGE}{NIR - RED / NIR + RED}$	Barnes et al. (2000)
PSRI	$\frac{RED - GREEN}{REDEDGE}$	Merzlyak et al. (1999)
MSAVI	$\frac{2NIR + 1 - \sqrt{(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - RED)}}{2}$	Qi et al. (1994)

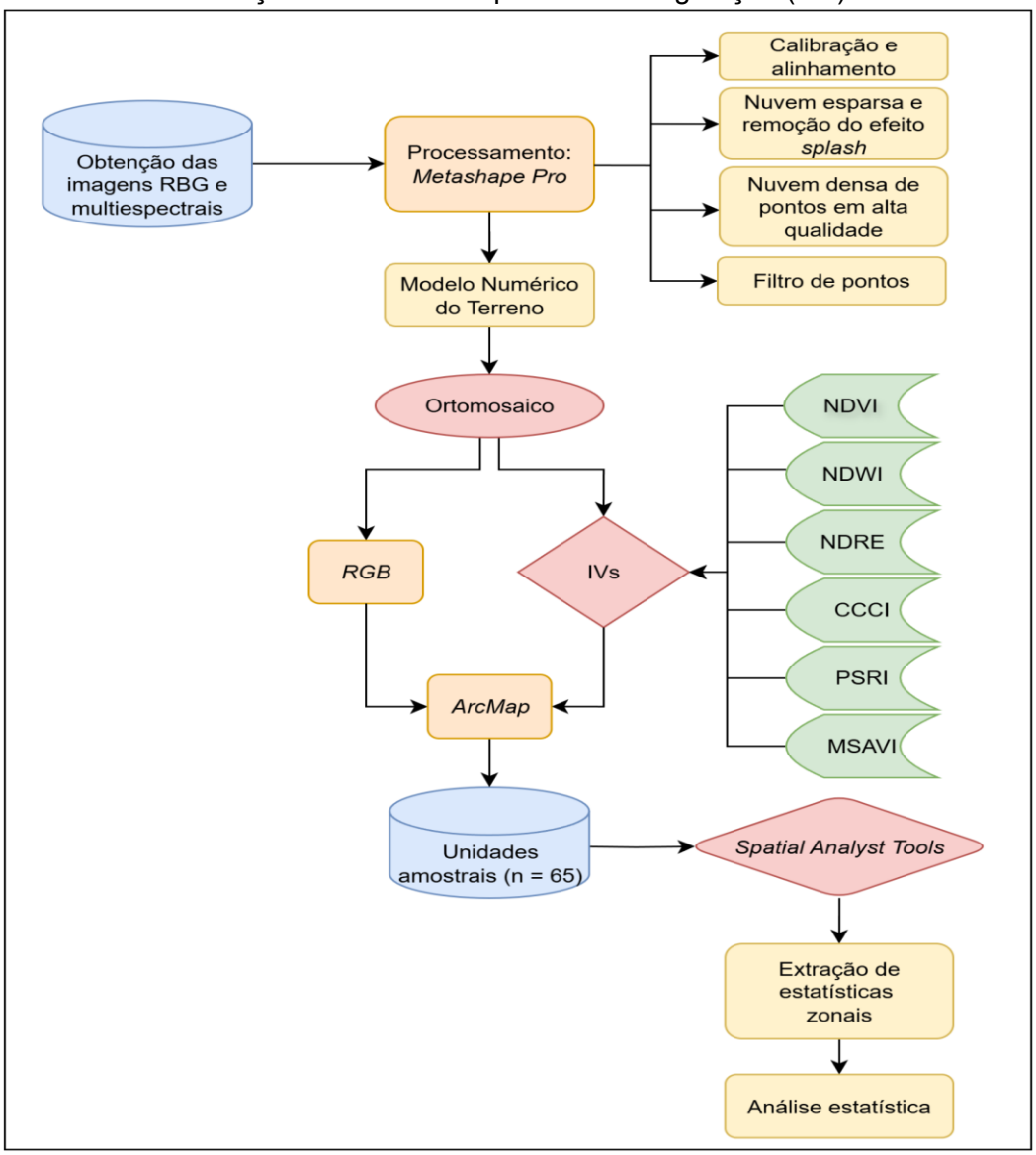
Legenda: NDVI = índice de vegetação por diferença normalizada; NDWI = índice de água de diferença normalizada; NDRE = índice normalizado de diferença na borda vermelha; CCCI = índice de conteúdo de clorofila do dossel; PSRI = índice de reflectância da senescência da planta; MSAVI = índice de vegetação ajustado ao solo modificado.
Fonte: Autores (2025).

Os ortomosaicos (RGB e índices espectrais de vegetação) foram exportados para uso em sistema de informações geográficas, em arquivos no formato geotiff, já recortado pelo limite da área de estudo (talhão). No SIG ArcMap (ESRI) versão 10.8, foi configurado um projeto e foram adicionados os ortomosaicos. Foi criado um arquivo shapefile de feição poligonal, onde foram vetorizadas 65 feições circulares identificadas (unidades amostrais) (Figura 1), com área de 8,13 m² que continha em torno de 1880 pixels, para coletar dados sobre os mosaicos dos índices de vegetação com uso da ferramenta zonal statistics as table no spatial analyst tools.

A estatística zonal coleta valores mínimos, médios e máximos dentro da área das unidades amostrais e armazena os dados coletados em tabela de dados no ArcMap (standalone table). O procedimento foi realizado para cada índice de vegetação. As tabelas de dados foram exportadas em arquivos de texto, que foram posteriormente importados para planilha eletrônica, sendo organizados para a realização de análises estatísticas (Figura 2).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2 - Fluxograma metodológico mostrando a sequência de processamento aplicada para a obtenção dos índices espectrais de vegetação (IVs).



Legenda: CCCI = *Canopy Chlorophyll Content Index*; MSAVI = *Modified Soil Adjusted Vegetation Index*; NDRE = *Normalized Difference Red Edge Index*; NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*; NDWI = *Normalized Difference Water Index*; PSRI = *Plant Senescence Reflectance*.
Fonte: Autores (2025).

2.2.3 Análise dos dados

As relações entre os índices espectrais de vegetação foram estabelecidas através de análises estatísticas utilizando o software R versão 4.5.0 (R Core Team, 2025). O teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* foi utilizado para avaliar a distribuição normal dos índices espectrais de vegetação. O teste de correlação de *Spearman* e a Análise de Componentes Principais (ACP) ($p < 0,05$) foram aplicados utilizando os pacotes *ggcorrplot* (Kassambara & Patil, 2023) e *Factoshiny* (Vaissie et al., 2023), respectivamente.

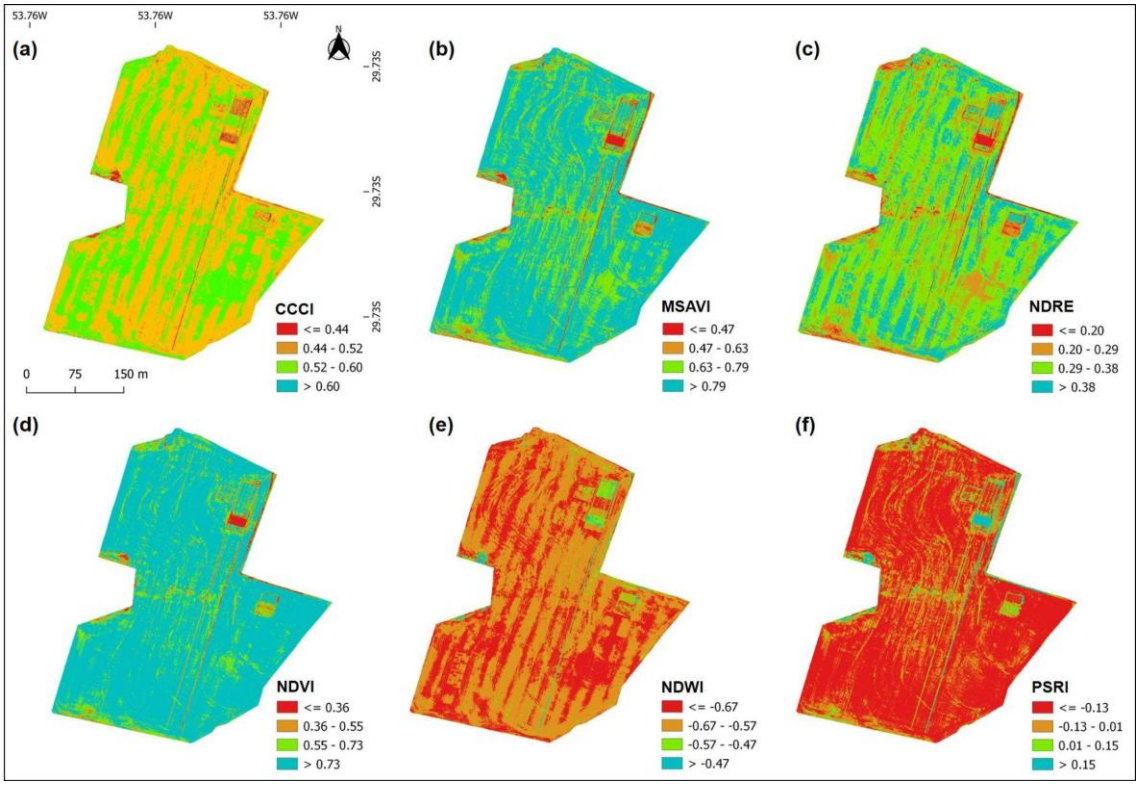
ISBN 978-65-990392-6-3

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO

Os IVs abordados no presente estudo expressaram as características para qual cada um foi proposto. Ainda, que a cultura do trigo estivesse em um estágio fenológico inicial, no elongamento. Tal efeito pode ser visualizado na Figura 3. E as diferenças entre os índices, evidenciadas e quantificadas na Figura 4 e Tabela 2.

Figura 3 - Índices espectrais de vegetação para a área de estudo com plantio de trigo. CCCI: *Canopy Chlorophyll Content Index*. MSAVI: *Modified Soil Adjusted Vegetation Index*. NDRE: *Normalized Difference Red Edge Index*. NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*. NDWI: *Normalized Difference Water Index*. PSRI: *Plant Senescence Reflectance Index*.



Fonte: Autores (2025).

O índice NDVI (Fig 03 - D), que é utilizado para verificar o estado de vigor das plantas, apresentou desempenho satisfatório para esse fim. Dado que o trigo está em seu estágio fenológico inicial e ainda devido às fortes chuvas que incidiram na área no período de emergência da plântula, que fez com tivesse que ser replantada em grande parte da lavoura. O mesmo, conseguiu expressar também partes da lavoura que estão mais vigorosas, diferenças que podem ser notadas, quando comparamos com a figura 1. Esse efeito também foi percebido por Lindsey, et al. (2018), quando utilizou esse índice para estimar a produtividade do trigo nesse estágio fenológico.

Já o índice NDRE (Fig 03 - C), que pode ser utilizado como complemento do NDVI (Voitiki, et al. 2023), possibilitou a distinção dos locais de maior vigor da cultura. Tal informação permite ao gestor melhor informação de quão homogênea está sua lavoura. Além de oferecer informações para que seja realizado o manejo precoce, buscando maior homogeneidade e produção (KANG, Y. et al 2021), uma vez que essa fase da cultura é decisiva na sua produção final (RODRIGUES, 2000).

ISBN 978-65-990392-6-3

A sanidade da lavoura é outro fator importante para otimizar e antever seu manejo, seja por uso de fertilizantes ou agrotóxicos, são possíveis serem obtidas por meio dos índices CCCI, que expressa o conteúdo de clorofila na cultura, ou seja o quão vigorosa esta está (BARNES, 2000) e também o índice PSRI, que reflete os índices de carotenoides em relação a clorofila, que mostra quão debilitada a mesma se encontra. Entretanto, o último, também pode ser utilizado para verificar a homogeneidade da lavoura na ocasião da colheita, pois esse índice possibilita verificar o estado de senescência da cultura (SCHÖNERT, M. et al., 2015). Tal efeito ficou evidente quando visualizados na figura 3 - A e F.

O índice MSAVI (Fig 3 - B) que ajuda a minimizar o efeito do solo exposto na análise de vegetação, porém não conseguiu expressar de forma significativa tal efeito. Esse comportamento foi constatado por Daldegan et al.(2020), o mesmo relatou que, dependendo de seu estado fenológico, em culturas industriais esse índice pode não ser muito expressivo. Embora o mesmo conseguiu expressar de forma satisfatória o estado de vigor da planta, conforme já expresso pelo índice NDVI. Todavia, deve-se levar em consideração o estágio fenológico da cultura, que pode ter inibido o potencial desse índice.

Entretanto, quando observado em conjunto os índices MSAVI com o NDWI (Fig 3 B e E), que estima o conteúdo de água nas plantas e lavoura, percebe-se uma tendência coerente. Apesar de não se ter sido medido in situ a umidade do solo, o índice NDWI conseguiu captar as zonas úmidas da lavoura e também o efeito de vigor das plantas em diferentes estágios conforme estudo realizado por Solgi, S., Ahmadi, S. H. e Seidel, S. B. (2023) que investigaram o estresse hídrico da cultura do trigo em seus estágios fenológicos diferentes em três safras. Esse efeito pode ser visualizado quando comparamos o índice com a figura 1, que é a imagem da lavoura.

3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística dos índices espectrais NDVI, CCCI, NDRE, MSAVI e NDWI evidenciou baixos desvios-padrão e intervalos de confiança estreitos, de maneira geral indicando variações reduzidas na área estudada (Tabela 2). Os valores médios e os respectivos desvios padrão mostraram-se próximos entre si, destacando, por exemplo, o NDVImd (0,80; 0,05, respectivamente), CCCImd (0,45; 0, respectivamente), NDREmd (0,36; 0,04, respectivamente), MSAVImd (0,89; 0,03, respectivamente) e NDWImd (-0,67; 0,05, respectivamente). Essa baixa dispersão evidencia um padrão consistente de vigor vegetativo, teor de clorofila e umidade do dossel na área monitorada.

O índice PSRI apresentou valores negativos na maioria das medições, o que é indicativo de baixa senescência foliar, enquanto o NDWI também apresentou médias negativas, sugerindo um menor conteúdo hídrico na vegetação.

Como os dados não apresentaram distribuição normal (Tabela 2), a análise de correlação *Spearman* foi utilizada. A matriz de correlação entre os índices espectrais evidencia a forte colinearidade existente, principalmente entre aqueles associados à biomassa verde, como NDVI, NDRE e MSAVI (mínimo, médio e máximo) (Figura 4a). Esses índices apresentaram correlações positivas elevadas entre si ($r > 0,80$), confirmando que expressam informações complementares relacionadas ao vigor vegetativo da cultura.

Por outro lado, o PSRI apresentou correlação negativa com esses índices (r variando de -0,70 a -0,90), o que está de acordo com a sua sensibilidade ao avanço da senescência foliar e, portanto, sua relação inversa com o acúmulo de biomassa verde.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 2 - Estatísticas descritivas e de dispersão dos índices espectrais de vegetação (IVs) na área com cultivo de trigo.

IVs	M	EP	Med	Mo	DP	Var	Curt	Ass	Int	Mín	Máx	IC
NDVImn	0,57	0,01	0,56	Amodal	0,10	0,01	-0,47	0,17	0,45	0,33	0,78	0,0247
NDVImd	0,80	0,01	0,81	Amodal	0,05	0,00	-0,34	-0,57	0,21	0,68	0,89	0,0128
NDVImx	0,91	0,00	0,92	Amodal	0,03	0,00	-0,51	-0,58	0,10	0,85	0,96	0,0062
NDREmn	0,25	0,01	0,24	Amodal	0,04	0,00	-0,36	0,30	0,18	0,16	0,34	0,0102
NDREmd	0,36	0,00	0,36	Amodal	0,04	0,00	-0,79	-0,10	0,16	0,27	0,43	0,0093
NDREmx	0,46	0,01	0,46	Amodal	0,04	0,00	-0,68	0,03	0,17	0,38	0,55	0,0101
CCCImn	0,36	0,00	0,36	Amodal	0,03	0,00	-0,87	0,10	0,13	0,30	0,43	0,0083
CCCImd	0,45	0,00	0,45	Amodal	0,03	0,00	-1,02	-0,06	0,11	0,39	0,50	0,0066
CCCImx	0,56	0,01	0,56	Amodal	0,04	0,00	2,05	1,16	0,19	0,50	0,69	0,0101
PSRImn	-0,30	0,00	-0,30	Amodal	0,02	0,00	0,85	0,15	0,13	-0,37	-0,24	0,0057
PSRImd	-0,19	0,00	-0,19	Amodal	0,03	0,00	-0,18	0,36	0,16	-0,26	-0,10	0,0084
PSRImx	0,02	0,01	0,03	Amodal	0,08	0,01	-0,17	-0,16	0,38	-0,17	0,21	0,0202
NDWImn	-0,76	0,00	-0,77	Amodal	0,03	0,00	-0,38	0,17	0,15	-0,84	-0,69	0,0082
NDWImd	-0,67	0,00	-0,68	Amodal	0,04	0,00	-0,06	0,52	0,17	-0,74	-0,56	0,0094
NDWImx	-0,55	0,01	-0,55	Amodal	0,05	0,00	-0,19	0,23	0,24	-0,65	-0,41	0,0129
MSAVImn	0,72	0,01	0,71	Amodal	0,08	0,01	-0,30	-0,12	0,38	0,50	0,88	0,0202
MSAVImd	0,89	0,00	0,89	Amodal	0,03	0,00	-0,11	-0,69	0,13	0,81	0,94	0,0082
MSAVImx	0,95	0,00	0,96	Amodal	0,01	0,00	-0,46	-0,62	0,06	0,92	0,98	0,0034

Legenda: M = Média. EP = Erro padrão. Med = Mediana. Mo = Modo. DP = Desvio padrão. Var = Variância da amostra. Curt = Curtose. Ass = Assimetria. Int = Intervalo. Mín = Mínimo. Máx. = Máxima. IC = Nível de confiança a 95%.

Fonte: Autores (2025)

O NDWI também demonstrou correlações negativas com NDVI, NDRE e MSAVI (*r* entre -0,50 e -0,90), refletindo a diferença entre a resposta espectral ao conteúdo hídrico e à biomassa. Já o CCCI apresentou correlações moderadas com os demais índices (*r* entre 0,3 e 0,6), sugerindo que captura variações adicionais relacionadas ao teor de clorofila.

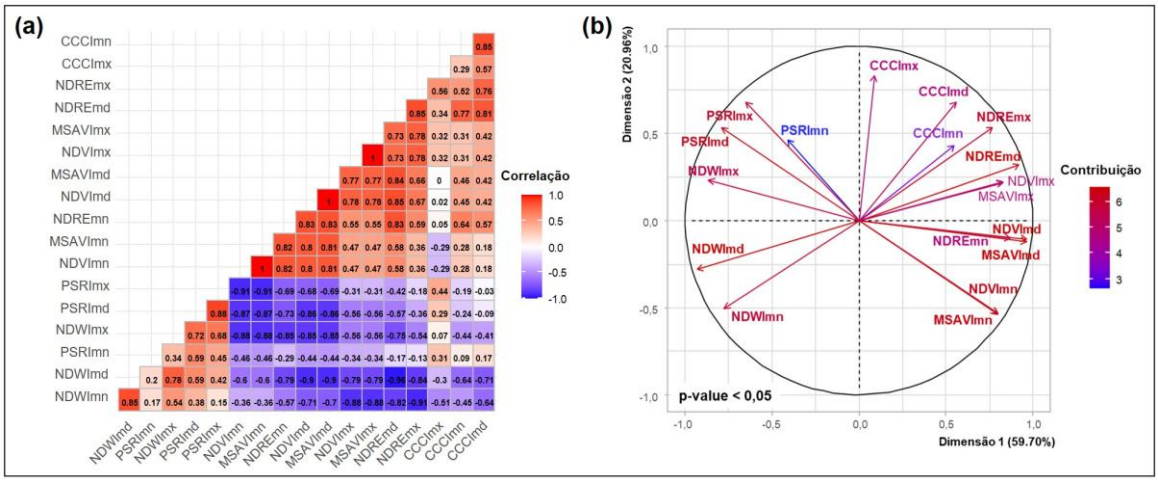
Esses padrões confirmam os resultados obtidos na análise de componentes principais (PCA), em que os índices de biomassa se agruparam em um mesmo eixo, enquanto PSRI e NDWI se distribuíram em direções opostas, ressaltando a complementaridade entre eles na caracterização dos estádios fenológicos do trigo (Figura 4b).

A análise de componentes principais (PCA) considerando os valores mínimos, médios e máximos dos índices espectrais explicou 80,66% da variabilidade dos dados nos dois primeiros eixos (dimensão 1 = 59,70% e dimensão 2 = 20,96%; Figura 4b). O primeiro eixo esteve fortemente associado aos índices de vegetação NDVI, NDRE e MSAVI, em suas diferentes estatísticas (mínimo, médio e máximo), todos com altas contribuições (> 7% em alguns casos), evidenciando que esses índices compartilham informações relacionadas ao vigor da cultura e ao acúmulo de biomassa.

Em oposição, NDWI apresentou orientação contrária no eixo 1, refletindo a sua relação inversa com o conteúdo hídrico em comparação à biomassa verde. O segundo eixo destacou maior contribuição do PSRI (valores mínimo e máximo) e do CCCI (principalmente o valor máximo), reforçando seu papel na caracterização de aspectos ligados ao teor de clorofila e ao início de processos de senescência.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 4 - Matriz de correlação de Spearman (a) e análise de componentes principais (PCA), mostrando a relação entre os índices espectrais (b).



Legenda: CCCImn, CCCImd e CCCImx: *Canopy Chlorophyll Content Index* mínimo, médio e máximo; MSAVImn, MSAVImd e MSAVImx = *Modified Soil Adjusted Vegetation Index* mínimo, médio e máximo; NDREmn, NDREmd e NDREmx = *Normalized Difference Red Edge Index* mínimo, médio e máximo; NDVImn, NDVImd e NDVImx = *Normalized Difference Vegetation Index* mínimo, médio e máximo; NDWImn, NDWImd e NDWImx = *Normalized Difference Water Index* mínimo, médio e máximo; PSRImn, PSRImd e PSRImx = *Plant Senescence Reflectance Index* mínimo, médio e máximo, respectivamente.
Fonte: Autores (2025).

O fato de diferentes estatísticas (mínimo, médio e máximo) de um mesmo índice se agruparem em posições próximas no plano fatorial indica consistência na resposta das métricas, e também forte colinearidade entre elas. Esses resultados mostram que a combinação de índices relacionados à biomassa (NDVI, NDRE e MSAVI), ao status hídrico (NDWI) e à senescência (PSRI e CCCI) pode ser utilizada de forma complementar para discriminar os estádios fenológicos do trigo e compreender melhor a dinâmica espectral ao longo do ciclo da cultura.

4 CONCLUSÃO

Esses resultados demonstraram que os IVs têm potencial como ferramentas não destrutivas para monitoramento da sanidade precoce da cultura de trigo, já no estágio de elongação.

Do ponto de vista prático, a identificação precoce das deficiências nutricionais pode auxiliar na tomada de decisões ao permitir intervenções rápidas e eficazes, maximizando a produtividade e reduzindo custos operacionais. Ademais, o uso eficiente e direcionado de fertilizantes contribui para a sustentabilidade ambiental, maximizando a eficiência dos insumos, reduzindo o risco de contaminação do solo e de recursos hídricos, além de reduzir os custos da lavoura, proporcionando economia.

Por fim, reconhecemos algumas limitações do estudo, tais como o curto período experimental. Inexistência de condições variadas da cultura, tanto em estágio fenológico quanto ou condições de sanidade e fitossanidade da cultura.

Recomenda-se, portanto, que futuras pesquisas ampliem o período experimental, abordem diferentes estágios fenológicos e avaliem uma cultura em diferentes níveis de

ISBN 978-65-990392-6-3

estresse. Além de relacionar esses valores com a produtividade, contribuindo para validar e expandir o alcance das conclusões obtidas.

REFERÊNCIAS

BARNES, E. M.; T. R. CLARKE; S. E. RICHARDS; P. D. COLAIZZI; J. HABERLAND; M. KOSTRZEWSKI; et al. **Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data**. In: Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture, 2000.

BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASSU, R. Y. **Agricultura de Precisão**: Resultados de um novo olhar. BERNARDI et al.. 2014.

BOSCHETTI, M.; BUSETTO, L.; MANFRON, G.; LABORTE, A.; ASILO, S.; PAZHANIVELAN, S.; NELSON, A. PhenoRice: A method for automatic extraction of spatio-temporal information on rice crops using satellite data time series. **Remote Sensing of Environment,** v. 194, p. 347-365, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.029.

CAMMARANO, D.; FITZGERALD, G.; BASSO, B.; O'LEARY, G.; CHEN, D.; GRACE, P.; FIORENTINO, C. Use of the Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI) for remote estimation of wheat nitrogen content in rainfed environments. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, n. 6, p. 1597-1603, 2011. DOI: https://doi.org/10.2134/agronj2011.0124.

CHRISTENSEN, L. K.; RODRIQUEZ, D.; BELFORD, R.; SADRAS, V.; RAMPANT, P.; FISHER, P. Temporal prediction of nitrogen status in winter wheat under the influence of water deficiency using spectral and thermal information. Crop variability and resulting management effects. In: Stafford JV (ed). **Precision Agriculture**. Wageningen Academic Publisher, 209–216. 2005.

CQFS. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, Comissão de Química e Fertilidade do Solo RS/SC. p. 376. 2016.

DALDEGAN, A.; GONZALEZ-ROGLICH, G.; NOON, M.; ZVOLEFF, A. I. Assessing the performance of NDVI, 2-band EVI and MSAVI vegetation indices for land degradation monitoring across variable biomass cover at global scale [Abstract]. **American Geophysical Union**, Fall Meeting, 2020. Disponível em: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020AGUFMSY0030008A/abstract. Acesso em: 10 de out. 2025.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. ISBN 978-85-7975-277-3.

GAO, B. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**. v. 58, ed. 3. p. 257-266. 1996. DOI: https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3.

GOODWIN, A. W.; LINDSEY, L. E.; HARRISON, S. K.; PAUL, P. A. Estimating wheat yield with normalized difference vegetation index and fractional green canopy cover. **Crop, Forage & Turfgrass Management**, v. 4, p. 1-6, 2018. DOI: https://doi.org/10.2134/cftm2018.04.0026.

INMET. **Dados meteorológicos**. Instituto Nacional de Meteorologia. 2024. Disponível em: https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes.

KANG, Y.; HU, X.; MENG, Q.; ZOU, Y.; ZHANG, L.; LIU, M.; ZHAO, M. Land cover and crop classification based on red edge indices features of GF-6 WFV time series data. **Remote Sensing**, v. 13, p. 4522, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/rs13224522.

KASSAMBARA, A. (2023). **_ggcorrplot: Visualization of a Correlation Matrix using 'ggplot2'_**. R package version 0.1.4.1. Disponível em: https://CRAN.R-project.org/package=ggcorrplot.

KLERING, E. V.; FONTANA, E. V.; ROGLIO, V. S.; ALVES, R. C. M.; BERTALO, M. A. Modelo agrometeorológico-espectral para estimativa da produtividade de grãos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Bragantia**, Campinas, v.75, n.2, p.247-256, 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/1678-4499.287.

KUPLICH, T. M.; MOREIRA, A.; FONTANA, D. C. Série temporal de índice de vegetação sobre diferentes tipologias vegetais no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 55, p. 1116-1123, 2013. DOI: https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001000014.

MERZLYAK, M. N.; GITELSON, A. A.; CHIVKUNOVA, O. B.; RAKITIN, V. Y. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia Plantarum**, v. 106, ed. 1, p. 135-141, 1999. DOI: https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x.

POVH, F. P.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R.; SALVI, J. V. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 8, p. 1075-1083, 2008. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000800018.

QI, J.; CHEHNOUNI, A.; HUETE, A. R.; KERR, Y. H.; SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v. 48, p. 119–126. 1994. DOI: https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1.

R CORE TEAM. (2025). **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: https://www.R-project.org/

RCBPTT. **Informações técnicas para trigo e triticale**: safra 2024 e 2025**.** In: ALMEIDA, J. L (Orgs.). Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, p. 246, 2024.

REN, S.; CHEN, X.; NA, S. Assessing plant senescence reflectance index-retrieved vegetation phenology and its spatiotemporal response to climate change in the Inner Mongolian Grassland. **International Journal of Biometeorology**, v. 61, n. 4, p. 601-612, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/s00484-016-1236-6.

RISSINI, A. L. L.; KAWAKAMI, J.; GENÚ, A. M. Índice de vegetação por diferença normalizada e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de Nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1703-1713, 2015. DOI: https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140686.

RODRIGUES, O. Manejo de trigo: bases ecofisiológicas. In: CUNHA, G. R. da; BACALTCHUK, B. (Org.). **Tecnologia para produzir trigo no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Assembléia Legislativa do Rio Grande do Sul - Comissão de Agricultura, Pecuária e Cooperativismo; Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. p. 120-155.

RODRIGUES, O.; TEIXEIRA, M. C. C.; COSTENARO, E. R.; SANA, D. Ecofisiologia do trigo: bases para elevado rendimento de grãos. In: PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, G. R. da (Ed.). **Trigo no Brasil**: bases para produção competitiva e sustentável. Passo Fundo: Embrapa Trigo. cap. 5, p. 115-134. 2011.

ROUSE, J. W.; HASS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. **ANAIS...**. Washington, USA: NASA. Goddart Space Flight Center, 1973.

ISBN 978-65-990392-6-3

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A.; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 6. ed. rev. e ampl. p. 393. Brasília, DF: Embrapa, 2025.

SCHÖNERT, M.; ZILLMANN, E.; WEICHELT, H.; EITEL, J. U. H.; MAGNEY, T. S.; LILIENTHAL, H.; SIEGMANN, B.; JARMER, T. The Tasseled Cap Transformation for RapidEye data and the estimation of vital and senescent crop parameters. International Archives of the Photogrammetry, **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XL-7/W3, p. 101-108, 2015. DOI: https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-101-2015.

SOLGI, S.; AHMADI, S. H.; SEIDEL, S. J. Remote sensing of canopy water status of the irrigated winter wheat fields and the paired anomaly analyses on the spectral vegetation indices and grain yields. **Agricultural Water Managemen**t, v. 280, art. 108226, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108226.

TILLING, A. K.; O'LEARY, G. J.; FERWERDA, J. G.; JONES, S. D, FITZGERALD, G. J.; RODRIGUEZ, D.; BELFORD, R. Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat. **Field Crops Research**, v.104, p. 77–85, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.03.023.

VAISSIE, P.; MONGE, A.; HUSSON, F. (2023). **_Factoshiny: Perform Factorial Analysis from 'FactoMineR' with a Shiny Application_**. R package version 2.5. https://CRAN.R-project.org/package=Factoshiny

VOITIKI, A.; KRAVCHENKO, V.; PUSKA, O.; KUTKOVETSKA, T.; SHCUR, T.; KOCIRA, S. Comparison of NDVI, NDRE, MSAVI and NDSI indices for early diagnosys of crop problems. **Agricultural Engineering**, v. 27, n. 1, p. 47-57, 2023. DOI: https://doi.org/10.2478/agriceng-2023-0004.

ZDENEK, Z.; PETER, H.; KAREL, P. S; DANIELA, S.; JAN, B. Impacts of water availability and drought on maize yield – A comparison of 16 indicators. **Agricultural Water Management**, v. 188, p. 126-135, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.04.007.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 67

IMAGEAMENTO COM DRONES E MODELAGEM TOPOGRÁFICA PARA SIMULAR ÁREAS POTENCIAIS DE EROSÃO HÍDRICA EM LAVOURAS

Drone imaging and topographic modeling to simulate potential water-erosion hotspots in croplands

Vitor Cargnin Pegoraro[1]; Guilherme Bortolotto da Silva[1]; André Müllich[1]; Luiz Felipe Silveira Pavão[1]; Luciano Zucuni Pes[1]; Marcelo Silveria de Farias[1]; Ivan Carlos Maldaner[1]; Jaqueline Sgarbossa[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria - RS, Brasil, vitorcpegoraro@gmail.com, guilhermebortolottodasilva@gmail.com, andre.mullich@hotmail.com, felipepavao14@gmail.com, lucianopes@politecnico.ufsm.br, marcelo.farias@ufsm.br, ivan.maldaner@ufsm.br, sgarbossa.jaqueline@ufsm.br

RESUMO

O estudo teve como objetivo realizar a avaliação topográfica de um talhão agrícola, visando compreender o relevo e o comportamento do escoamento superficial da água para estimar perdas de solo por erosão hídrica. Para isso, empregou-se um drone DJI Phantom 4 Pro, aliado a receptores GNSS em RTK e ao processamento em softwares de precisão e digital, como o Agisoft Metashape e o AgroCAD®. A metodologia permitiu a geração de produtos cartográficos como ortomosaico, curvas de nível, mapas de declividade, de tendência e de velocidade do escoamento superficial. A integração desses dados possibilitou elaborar o mapa de estimativas de perda de solo, considerando o limite crítico de 6 t ha^{-1} ano^{-1} para o Argissolo Vermelho Distrófico típico. Os resultados demonstraram que 37,67% da área apresentou perdas acima do tolerável, indicando a necessidade de práticas conservacionistas, como terraceamento, linhas em nível e manutenção de cobertura vegetal, enquanto 62,33% permaneceram dentro do limite aceitável. O estudo evidencia a importância da Agricultura de Precisão e Digital na caracterização do relevo e no planejamento de manejos para minimizar a erosão e garantir maior sustentabilidade produtiva.

Palavras-chave: 1. Erosão hídrica 2. Agricultura Digital 3. Conservação do solo.

ABSTRACT

This study aimed to carry out the topographic survey of an agricultural field in order to understand the relief and the behavior of surface water flow to estimate soil loss caused by water erosion. For this purpose, a DJI Phantom 4 Pro drone was employed, combined with GNSS RTK receivers and processing in precision and digital software, such as Agisoft Metashape and AgroCAD®. The methodology allowed the generation of cartographic products such as the orthomosaic, contour lines, slope maps, flow direction maps, and surface runoff velocity maps. The integration of these data enabled the elaboration of the soil loss estimation map, considering the critical tolerance limit of 6 t ha^{-1} $year^{-1}$ for the typical Red Dystrophic Ultisol. The results showed that 37.67% of the area presented soil losses above the tolerable limit, indicating the need for conservation practices such as terracing, contour farming, and permanent soil cover, while 62.33% remained within the acceptable range. The study highlights the importance of Precision and Digital Agriculture in characterizing relief and supporting management planning to minimize erosion and ensure greater productive sustainability.

Keywords: 1. Water erosion 2. Soil conservation 3. Sustainable agriculture.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

A rápida expansão das fronteiras agrícolas, aliada ao uso intensivo da terra e às mudanças climáticas, têm provocado impactos negativos sobre os solos brasileiros, reduzindo drasticamente sua capacidade produtiva e elevando os custos de produção. Grande parte desses problemas está associada à erosão hídrica, considerada o principal fator de degradação dos solos em escala global, responsável por cerca de 56% das áreas degradadas (OLDEMAN; HAKKELING; SOMBROEK, 1991). Esse processo configura-se como uma das maiores barreiras ao desenvolvimento sustentável da agricultura, sobretudo em terrenos declivosos. Práticas inadequadas de manejo intensificam o efeito das gotas de chuva e do escoamento superficial, promovendo a desagregação das partículas, seu transporte e deposição (HUDSON, 1977; BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990; MORGAN, 2005).

Além disso, o uso contínuo das áreas agrícolas acelera o desequilíbrio físico-químico dos solos quando comparado a ecossistemas florestais. Alterações como aumento da densidade, redução da porosidade total, diminuição da estabilidade de agregados (diâmetro médio ponderado e geométrico) e menores estoques de carbono e nitrogênio (ENCK et al., 2020) ampliam a suscetibilidade à erosão, especialmente em cultivos anuais. Estima-se que, no Brasil, as perdas anuais alcancem 500 milhões de toneladas de solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010). Um estudo realizado no Paraná e extrapolado para o país indicou que os prejuízos relacionados à remoção de macronutrientes (K, P, Ca e Mg) ultrapassam R$ 2,11 bilhões anuais (TELLES et al., 2011). Esses impactos se estendem também ao meio ambiente, resultando em assoreamento e poluição dos recursos hídricos (ALVES; SILVA, 2020).

A severidade da erosão, entretanto, varia conforme a interação entre regime pluviométrico, tipo de solo, manejo adotado e condições topográficas (PORTELA et al., 2011). Quando a remoção de solo excede o limite tolerável, medidas de controle tornam-se imprescindíveis. O desafio é agravado pelo lento processo natural de formação do solo: estima-se que sejam necessários cerca de 300 anos para a adição de apenas 1 cm de solo, dependendo das condições climáticas, edáficas e de cobertura vegetal (EMBRAPA, 2003). Em contrapartida, áreas degradadas sem perda da camada superficial podem recuperar parcialmente sua capacidade produtiva em 3 a 5 anos com práticas adequadas (DAILY, 1995). Já solos severamente degradados, embora passíveis de recuperação, podem demandar até um século para se tornarem novamente aptos ao uso agrícola (BLANCO-CANQUI; LAL, 2010).

Esse desequilíbrio entre a rápida degradação e a lenta regeneração compromete o potencial produtivo, eleva os custos e desvaloriza economicamente as áreas agrícolas. Apesar disso, ainda persiste a negligência em relação a práticas conservacionistas eficazes, como a manutenção de cobertura vegetal, a semeadura em nível e o uso de terraços — muitas vezes eliminados em função da mecanização. Esse descuido contribui para projeções preocupantes: estima-se que, entre 2015 e 2070, as taxas globais de erosão do solo aumentem entre 30% e 66% (SARTORI et al., 2024).

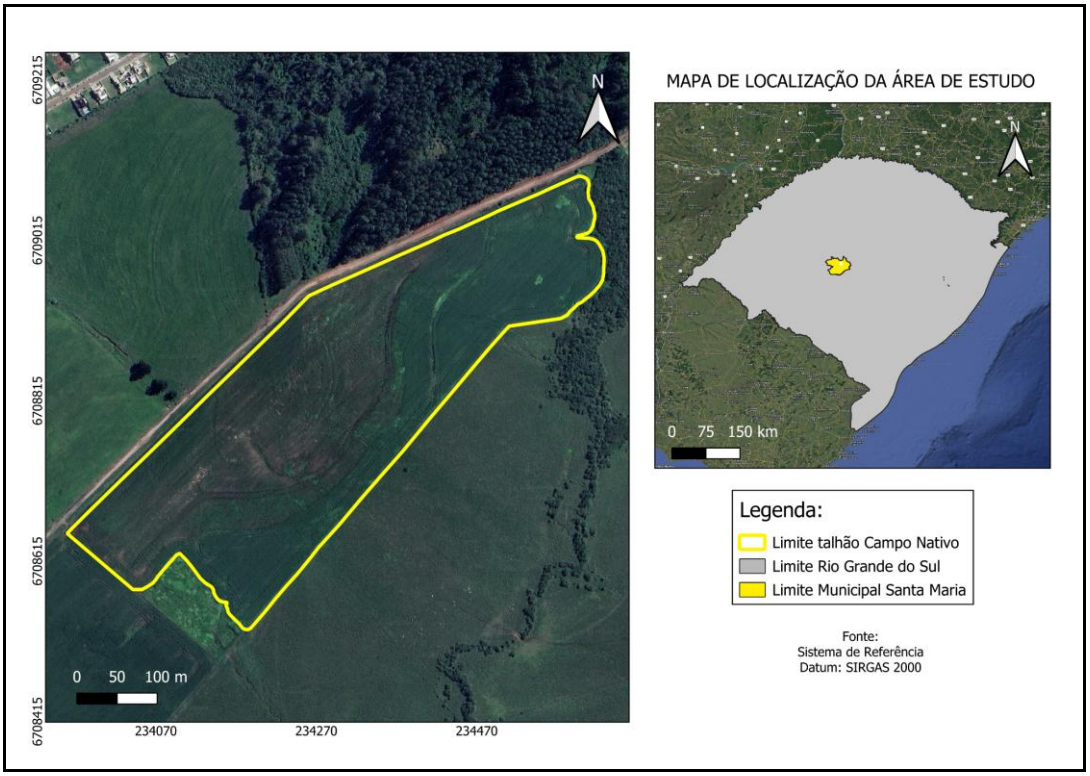
Nesse contexto, a modernização do setor agrícola tem impulsionado a busca por soluções tecnológicas que auxiliem na mitigação da erosão hídrica. Entre elas, destacam-se os drones e as plataformas digitais, que possibilitam levantamentos rápidos, detalhados e georreferenciados, ampliando a capacidade de diagnóstico e o planejamento de práticas conservacionistas. Assim, este estudo propõe-se a integrar tecnologias emergentes e conhecimento técnico-científico para evidenciar a problemática e, demonstrar alternativas viáveis de manejo, fundamentais à mitigação das perdas e à resiliência dos sistemas agrícolas frente a eventos climáticos cada vez mais extremos.

ISBN 978-65-990392-6-3

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os estudos foram realizados na Área Agropecuária do Colégio Politécnico da UFSM, em Santa Maria, RS, no talhão denominado Campo Nativo, com área de 13,93 ha. A área em questão possui as coordenadas geográficas centrais em Latitude 29º 43’ 20” Sul e Longitude 53º 44’ 48” Oeste, com o solo classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico, caracterizado por teores de argila em torno de 20,0% no horizonte superficial e acima de 50,0% no horizonte B textural, além de possuir moderada fertilidade natural e forte suscetibilidade à erosão (SANTOS et al., 2018), devido ao horizonte Bt, que gera o acúmulo da água nas camadas mais superficiais, além das altas intensidades das chuvas no RS. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região do estudo é do tipo Cfa, com verões quentes e subtropical úmido. O regime de chuvas é classificado como Isoígro, com pluviosidade bem distribuída ao longo do ano (ALVARES et al., 2013), podendo ocorrer algumas oscilações na intensidade e volume das chuvas conforme o ano. A Área Agropecuária abriga experimentos voltados à Agricultura de Precisão e à sustentabilidade. As atividades integram ensino, pesquisa e extensão, com o objetivo de racionalizar o uso de insumos e promover a capacitação de futuros profissionais no uso de novas tecnologias aplicadas à agricultura (Figura 1).

Figura 1 - Localização e delimitação do talhão em estudo, denominado Campo Nativo, na Área Agropecuária do Colégio Politécnico.



Fonte: Google Earth (2025)

Inicialmente, foi definida uma sequência metodológica até a obtenção final dos mapas e das práticas conservacionistas sugeridas para o talhão. Na primeira etapa, realizou-se o levantamento planialtimétrico com o uso de um par de receptores GNSS com correção em tempo real (RTK) e de um drone de imageamento DJI Phantom 4 Pro, equipado com câmera FC6310 (8,8 mm e resolução de 4864 × 3648 px) (Figura 2). O plano de voo foi elaborado com

ISBN 978-65-990392-6-3

rotas paralelas de cobertura total do talhão, câmera posicionada em ângulo nadiral (90° em relação ao solo) e parâmetros técnicos que incluíram altura média de voo de 98,3 m, além de sobreposição frontal de aproximadamente 75–80% e lateral de 70–75%, conforme práticas usuais para levantamentos com esse equipamento.

Durante o voo, realizado a velocidade média entre 4 e 6 m/s, foram adquiridas 135 imagens georreferenciadas, cobrindo uma área total de 0,251 km² (cerca de 25,1 ha), da qual 13,93 ha corresponderam efetivamente à área de interesse para o estudo. Para garantir a acurácia posicional, estabeleceram-se oito pontos de controle em solo (GCPs), distribuídos ao longo da área experimental e obtidos com receptores GNSS em RTK, os quais foram utilizados posteriormente no processo de calibração e processamento fotogramétrico das imagens.

Figura 2 - Drone de imageamento DJI Phantom 4 Pro utilizado no estudo.



Fonte: Autores (2025)

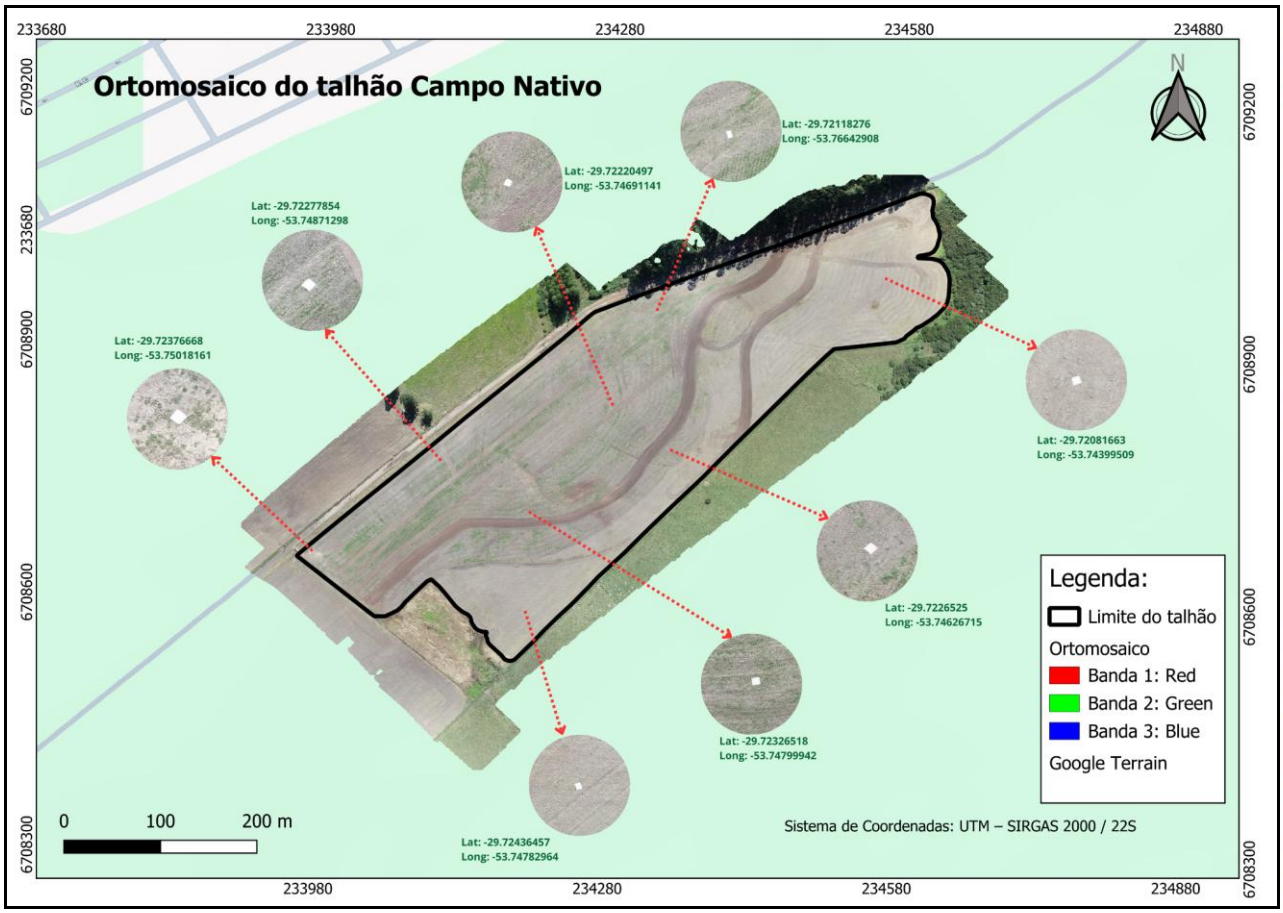
Posteriormente, as imagens coletadas pelo drone foram transferidas e processadas no *software Agisoft Metashape Professional*, no qual foram realizados os procedimentos de alinhamento preliminar das fotografias, identificação e inserção dos pontos de controle em solo (GCPs) e ajuste fino do georreferenciamento. Esse processamento assegurou a correta atribuição das coordenadas planialtimétricas e a manutenção das sobreposições definidas no plano de voo, garantindo maior acurácia posicional. A partir dessa etapa, foi gerado o mapa ortomosaico do talhão (Figura 3), com resolução espacial de 2,91 cm/pixel, considerado confiável quanto às medidas e localizações, e utilizado como base para as análises subsequentes e para a elaboração dos produtos cartográficos derivados.

Na sequência, foi gerada a nuvem densa de pontos, composta por milhares de coordenadas tridimensionais (X, Y e Z) extraídas das imagens aéreas. Esses pontos serviram de base para a elaboração do Modelo Digital de Superfície (MDS) e, posteriormente, para a criação das curvas de nível do terreno, definidas com equidistância vertical de 1 metro. O cálculo é realizado automaticamente pelo software, que conecta os pontos situados na mesma altitude e na distância vertical estipulada. Dessa forma, a cada metro de desnível do terreno é gerada uma curva de nível, resultando no mapa de curvas de nível do talhão (Figura 4), com

ISBN 978-65-990392-6-3

altitudes expressas em relação ao nível médio dos mares. Ressalta-se que a proximidade entre as curvas indica maior declividade da área, tornando esse produto cartográfico fundamental para a análise topográfica e, sobretudo, para a identificação das regiões que demandam maior adoção de práticas conservacionistas.

Figura 3 - Mapa do ortomosaico e pontos de controle do talhão *Campo Nativo*.



Fonte: Autores (2025)

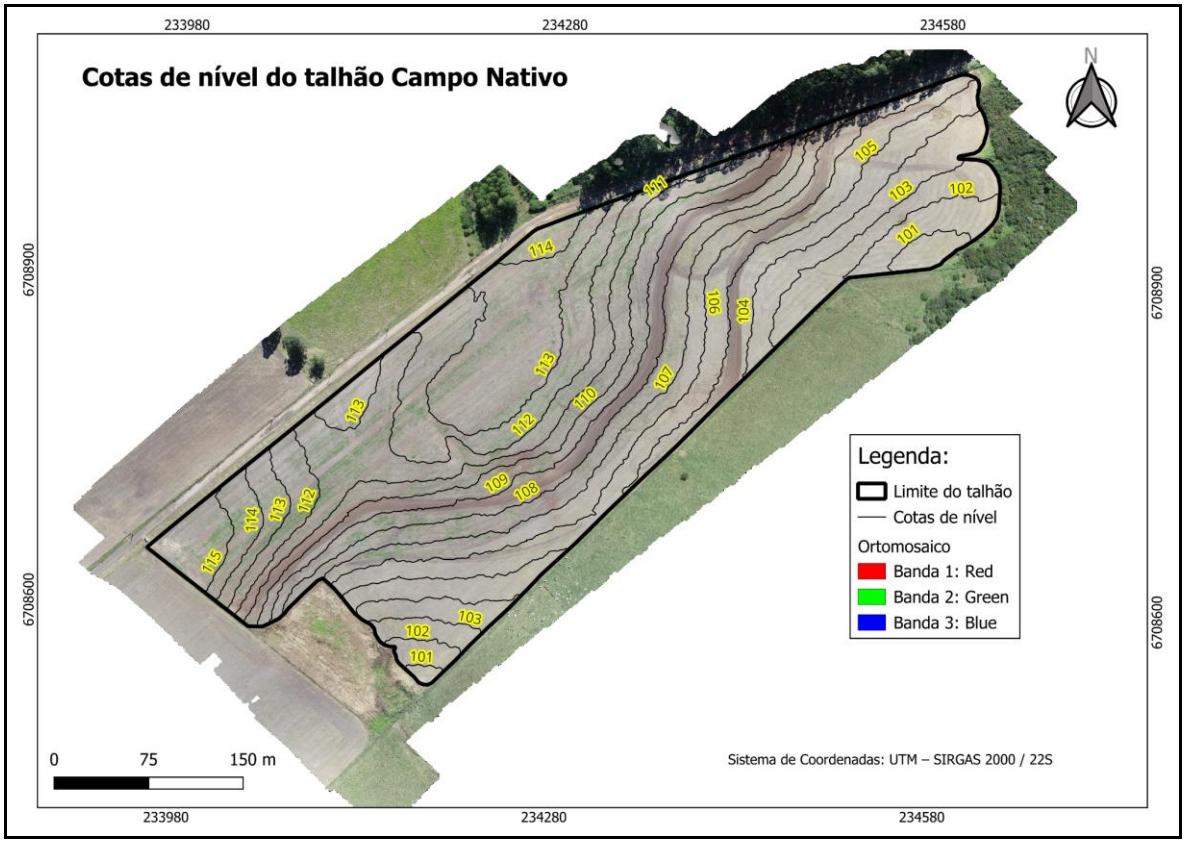
Na etapa seguinte, as curvas de nível geradas tornaram-se a base para o estudo topográfico da área. Os dados foram convertidos para o formato *shapefile* (SHP) e posteriormente importados para o *software* AgroCAD® (TecGraf Agro), no qual foram elaborados diferentes produtos cartográficos: o mapa de elevação do terreno, o mapa de declividade, o mapa de linhas de tendência do escoamento superficial, o mapa de velocidade de escoamento superficial e o mapa de perdas de solo. Este último foi construído considerando o limite de tolerância de perda de solo por erosão hídrica de 6 t ha^{-1} ano^{-1} (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990), adotado para o tipo de solo em estudo, e um regime pluviométrico médio acumulado de 1663 mm ano^{-1} (LANZANOVA et al., 2009).

A partir dessas informações, foram estabelecidas classes de perda de solo, permitindo identificar áreas críticas com excedente em relação ao limite tolerável, regiões em situação limítrofe e, ainda, porções que se mantêm abaixo da tolerância. Essa análise possibilitou compreender o comportamento do escoamento pluvial no talhão e serviu de base para a definição de práticas conservacionistas adequadas. Entre as medidas indicadas, destacam-se a instalação de terraços agrícolas, a semeadura em nível e a manutenção de cobertura permanente do solo, práticas que se mostraram essenciais para minimizar as perdas, aumentar

ISBN 978-65-990392-6-3

a sustentabilidade produtiva e evidenciar os benefícios do estudo para a gestão de propriedades agrícolas.

Figura 4 - Curvas de Nível do talhão Campo Nativo.



Fonte: Autores (2025)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os mapas elaborados, a primeira análise recaiu sobre a disposição do relevo do talhão, especialmente por meio do mapa de elevação do terreno (Figura 5). Esse produto cartográfico evidencia as variações altimétricas em relação ao nível médio dos mares, permitindo identificar as porções mais elevadas e mais baixas da área, fornecendo um panorama geral da tendência de fluxo da água. No presente estudo, o talhão analisado apresentou um gradiente altimétrico entre 100 e 116 metros, intervalo considerado fundamental para subsidiar a interpretação do escoamento superficial e a posterior definição de práticas conservacionistas.

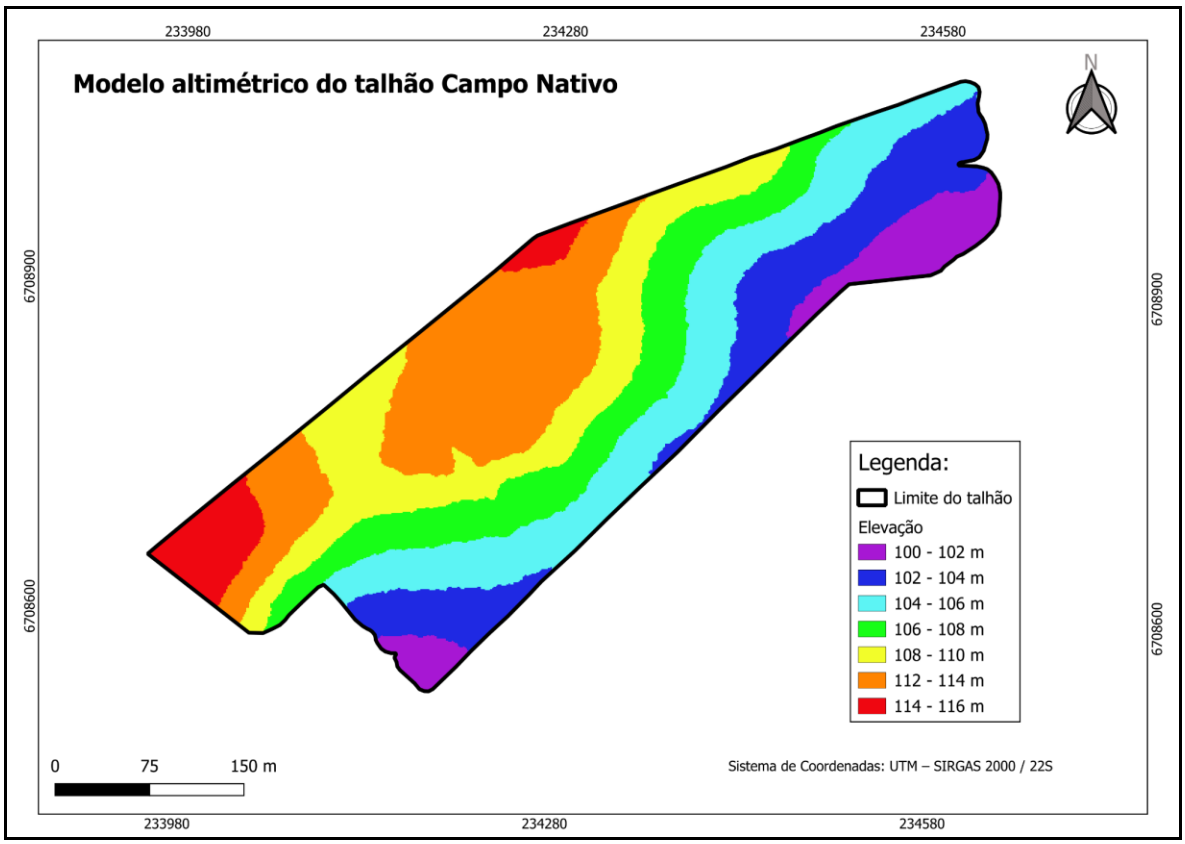
Para complementar a análise topográfica, elaborou-se o mapa de declividade do terreno (Figura 6), ferramenta essencial para identificar a inclinação da superfície do solo em relação ao plano horizontal, expressa em porcentagem. Esse produto permite visualizar as áreas com maiores desníveis, indicando os pontos críticos quanto ao risco de erosão e fornecendo subsídios ao planejamento de práticas conservacionistas, bem como à melhoria da segurança operacional e do desempenho produtivo.

No talhão em estudo, verificou-se a seguinte distribuição de classes de declividade: 1,76 ha com menos de 2%; 1,70 ha entre 2 e 4%; 1,96 ha entre 4 e 6%; 4,54 ha entre 6 e 8%; 2,74 ha entre 8 e 10%; e 1,23 ha com valores superiores a 10%. Resultando em uma declividade média de 8,21%. De acordo com o Sistema de Avaliação da Aptidão Agrícola das

ISBN 978-65-990392-6-3

Terras (RAMALHO FILHO; BEEK, 1995), áreas com declividade de até 8% apresentam baixa suscetibilidade à erosão, demandando apenas de práticas básicas de conservação, como o plantio em nível e a manutenção de cobertura vegetal, condição que abrange aproximadamente 71,5% da área analisada.

Figura 5 - Mapa de elevação do terreno.



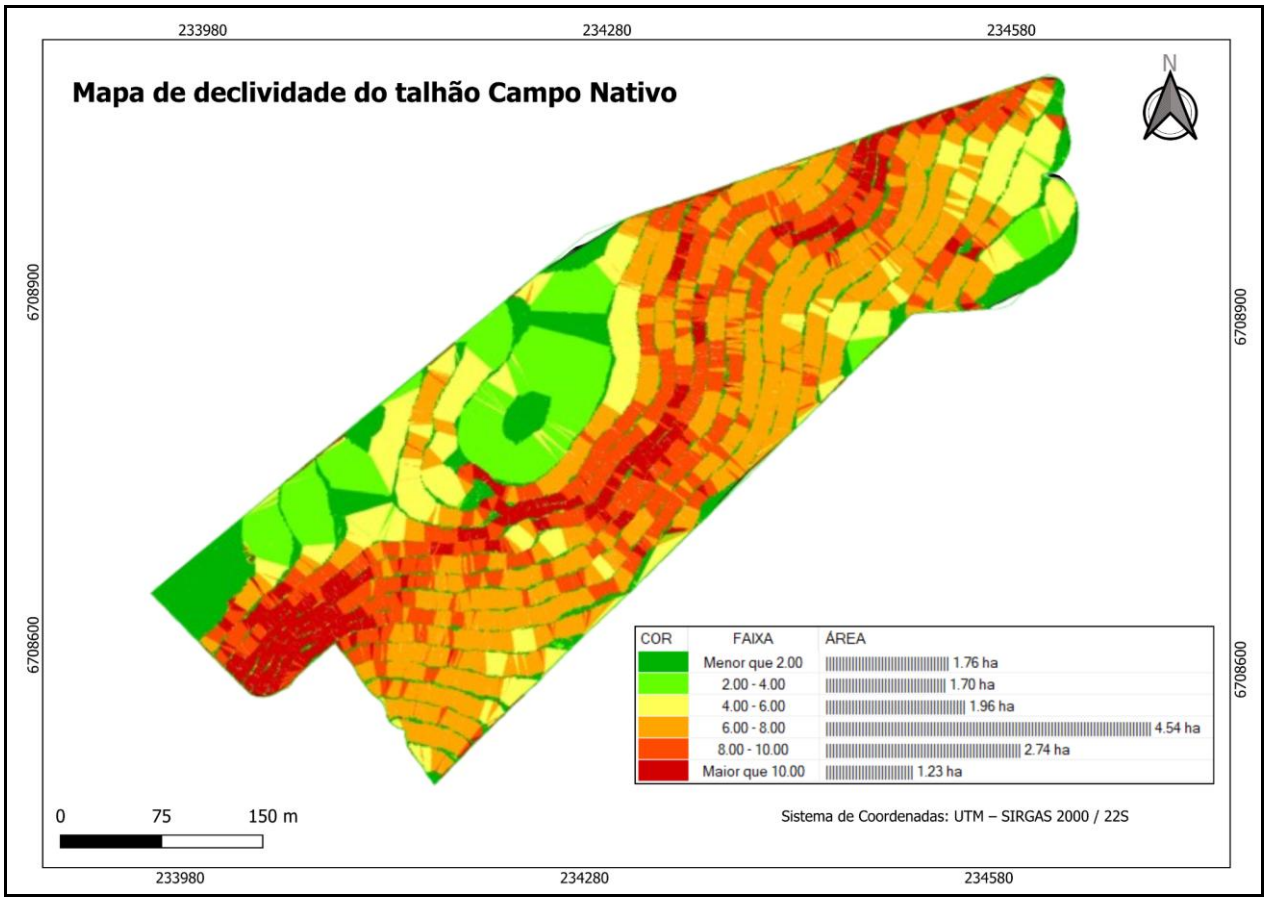
Fonte: Autores (2025)

Já os 28,5% restantes apresentam declividade superior a 8%, classificando-se como áreas de suscetibilidade moderada à erosão, nas quais se recomenda a adoção de práticas mais rigorosas, como o terraceamento, a fim de evitar a formação de sulcos e voçorocas que podem comprometer a produtividade, sobretudo em culturas anuais. Cabe destacar que o talhão não apresentou limitações significativas à mecanização agrícola, nem condições de alta suscetibilidade à erosão, o que favorece a definição de medidas conservacionistas pontuais e de fácil implementação, especialmente nas áreas críticas identificadas em vermelho no mapa.

Com base nos declives identificados, elaborou-se o mapa de tendência de escoamento superficial (Figura 7), cujo objetivo é representar a direção e a distância dos fluxos hídricos no talhão, a partir da interpretação das curvas de nível. O processamento é realizado de forma automatizada no *software* AgroCAD®, por meio de algoritmos vetoriais que utilizam as cotas altimétricas para indicar o caminho preferencial do escoamento da água. Dessa forma, as linhas de tendência simulam o trajeto hidráulico superficial, permitindo a visualização dos pontos de maior concentração de fluxo.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 6 - Mapa de declividade do terreno no talhão Campo Nativo.



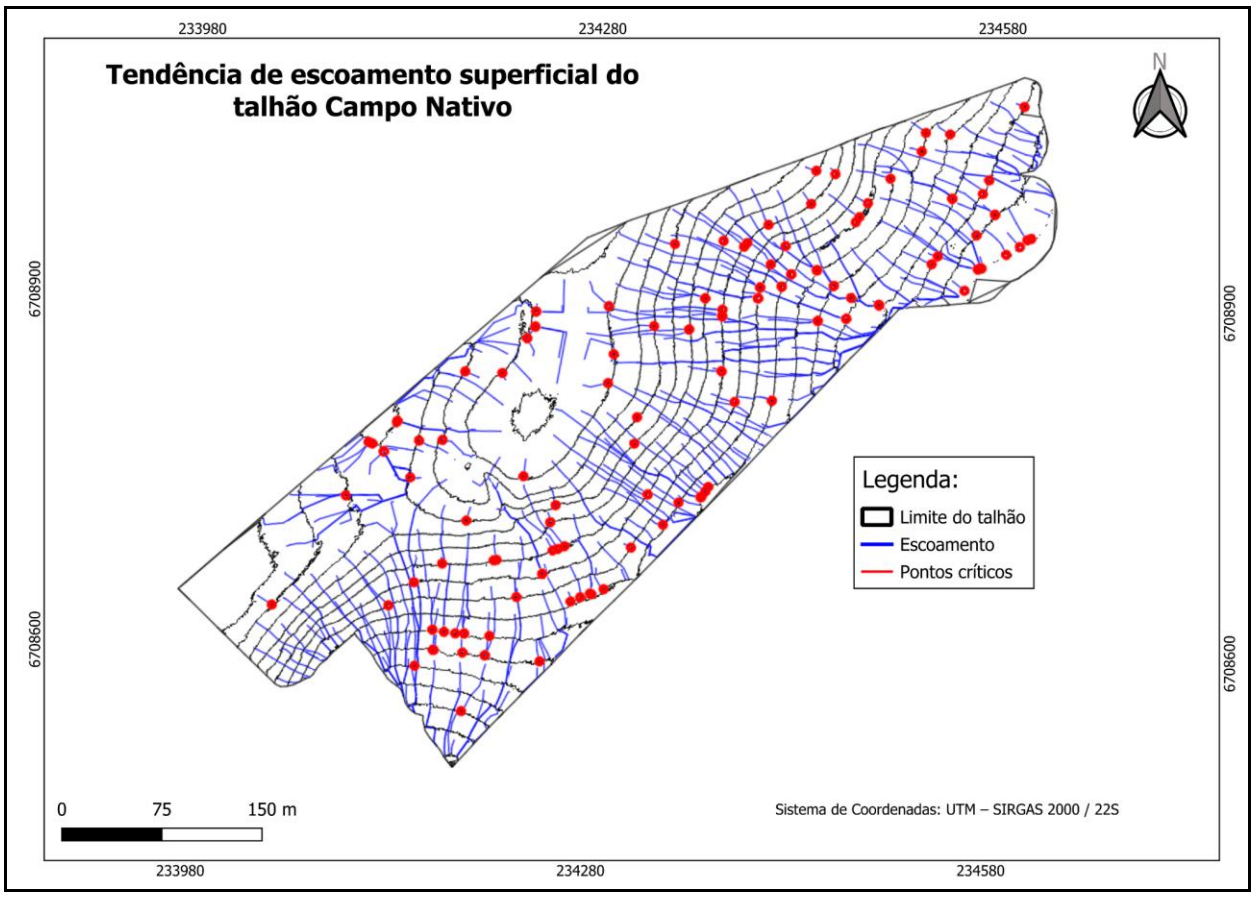
Fonte: Autores (2025).

As regiões em que há maior acúmulo de linhas representam áreas sujeitas a escoamento mais intenso e, portanto, com maior propensão à ocorrência de processos erosivos. Essa representação gráfica possibilita identificar zonas críticas de acúmulo de água e orientar decisões de manejo. Além disso, o *software* permite configurar diferentes cenários de intensidade pluviométrica, o que viabiliza simulações hidrológicas diversas e análises mais rigorosas, sobretudo em função da recorrência de eventos extremos de precipitação no estado do Rio Grande do Sul. Assim, a interpretação do mapa revelou que determinados pontos do talhão concentram maior movimentação hídrica, informação estratégica para a escolha de técnicas conservacionistas específicas e para o planejamento mais eficiente das intervenções de manejo.

O último indicador analisado foi o mapa de velocidade do escoamento superficial (Figura 8), elaborado com o intuito de representar a energia cinética associada ao deslocamento da água sobre a superfície do solo. Esse parâmetro é relevante por evidenciar os locais em que a força do escoamento atinge maiores valores, aumentando a suscetibilidade do talhão à ocorrência de erosão hídrica. Nessas regiões, a maior velocidade do fluxo superficial favorece o transporte de partículas de solo, tornando necessária a adoção de práticas conservacionistas mecânicas, técnicas e culturais voltadas à redução da velocidade da água e à minimização dos impactos erosivos.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 7 - Mapa de tendência de escoamento superficial do talhão do Campo Nativo.



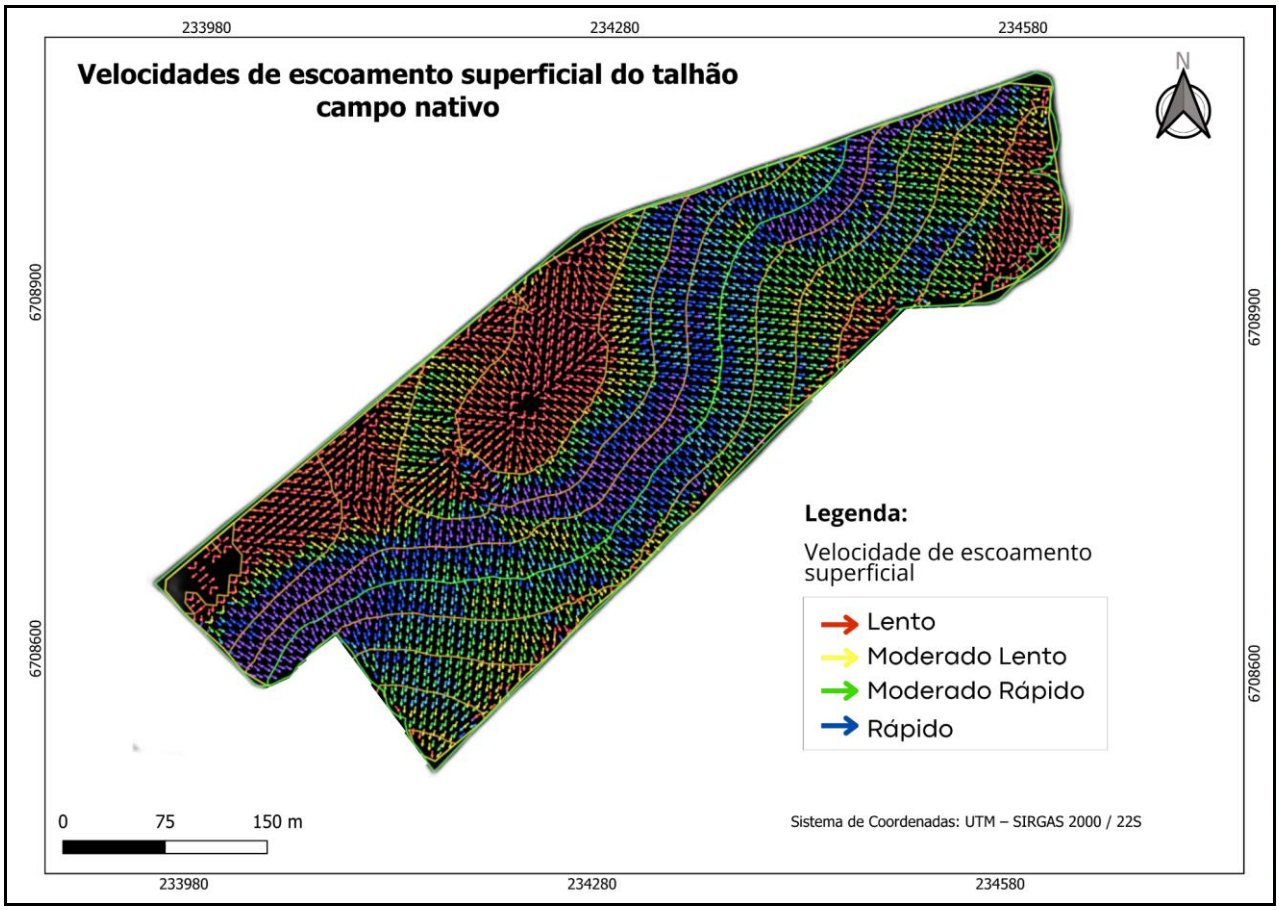
Fonte: Autores (2025)

A elaboração do mapa considerou as classes de declividade previamente definidas (Figura 6) e a precipitação acumulada média da região, estimada em 1663 mm ano^{-1} com base em uma série histórica de 16 anos (LANZANOVA et al., 2009). Os resultados mostraram que as áreas representadas em tons de verde e azul correspondem às maiores velocidades de escoamento, coincidindo com as regiões do talhão que apresentam maior declividade. Essa associação reforça a importância de direcionar medidas conservacionistas a esses pontos específicos, de forma a reduzir o risco de perdas de solo e garantir maior sustentabilidade produtiva.

Por fim, a partir da integração dos mapas de declividade, tendência e velocidade do escoamento superficial, foi possível elaborar o mapa de estimativas de perda de solo (Figura 9), considerando o limite crítico tolerável de 6 t ha^{-1} ano^{-1} para o Argissolo Vermelho Distrófico típico (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990). O talhão foi classificado em diferentes classes de perda anual de solo, apresentando a seguinte distribuição: 0 a 4 t ha^{-1} ano^{-1} em 5,29 ha (37,98% da área); 4 a 6 t ha^{-1} ano^{-1} em 3,39 ha (24,35% da área); 6 a 8 t ha^{-1} ano^{-1} em 2,97 ha (21,31% da área); 8 a 10 t ha^{-1} ano^{-1} em 1,47 ha (10,59% da área); e acima de 10 t ha^{-1} ano^{-1} em 0,80 ha (5,77% da área).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 8 - Mapa de velocidade do escoamento superficial do talhão.



Fonte: Autores (2025)

Com base nesses resultados, verificou-se que aproximadamente 37,67% do talhão apresenta perdas superiores ao limite crítico de tolerância, evidenciando a necessidade de intervenções conservacionistas específicas para reduzir os fluxos superficiais e, consequentemente, o transporte de partículas de solo. Em contrapartida, os 62,33% restantes da área permanecem dentro da faixa de tolerância, o que não compromete a capacidade produtiva do solo nem sua taxa natural de formação. Essa diferenciação espacial permite direcionar esforços de manejo de forma mais precisa, priorizando os locais mais suscetíveis à erosão e garantindo maior sustentabilidade produtiva ao sistema agrícola.

Adicionalmente, foi possível identificar setores específicos do talhão que demandam a adoção de medidas conservacionistas em virtude das perdas de solo acima do limite tolerável. O mapa de estimativas, portanto, configura-se como uma ferramenta estratégica de apoio à tomada de decisão, permitindo definir não apenas a prática mais adequada, mas também a sua localização mais assertiva dentro da área.

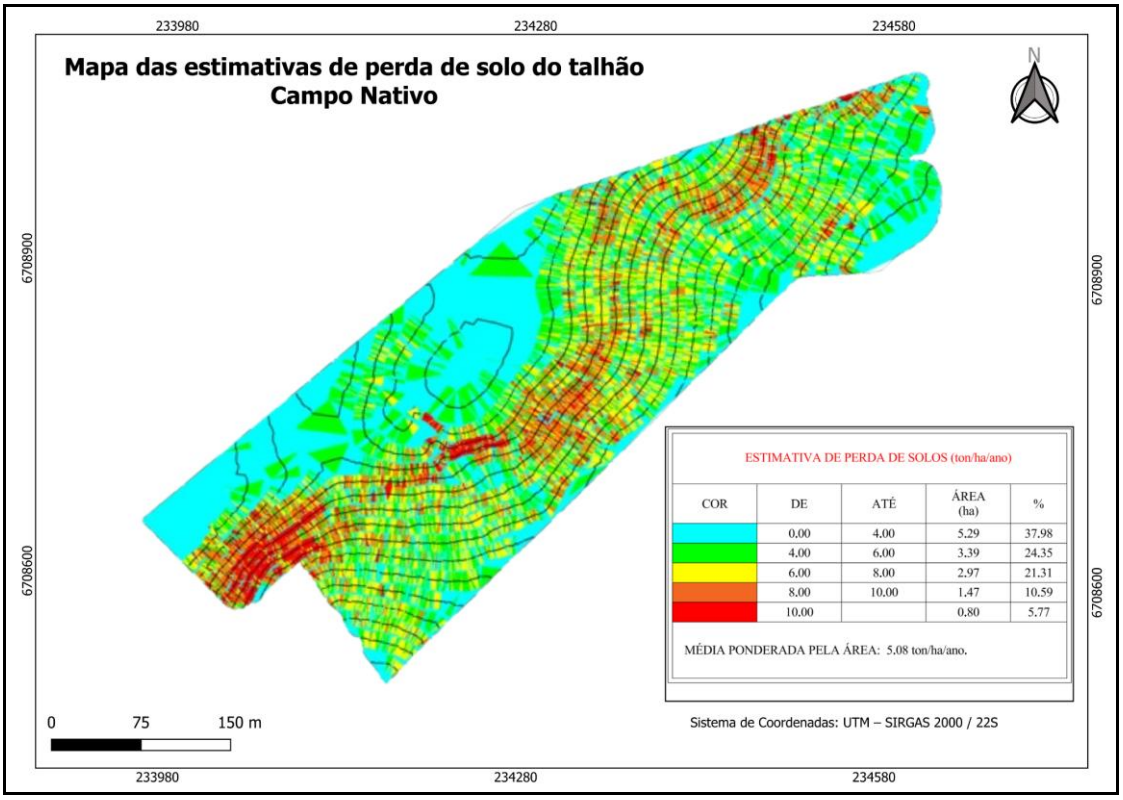
Para os pontos em que as perdas se mostraram superiores ao limite crítico, a prática do terraceamento destaca-se como fundamental, pois possibilita corrigir os locais mais vulneráveis e reduzir significativamente o impacto da erosão hídrica. Nas áreas que permaneceram abaixo do nível de tolerância, recomenda-se a manutenção da cobertura vegetal ao longo de todo o ano, prática simples e eficiente para preservar o solo. Já para o conjunto da área, a adoção de um projeto de linhas em nível apresenta-se como estratégia complementar, promovendo maior uniformidade no manejo conservacionista.

Assim, o estudo topográfico permitiu a análise detalhada do cenário erosivo e a indicação das práticas mais adequadas a cada situação, revelando pontos críticos que muitas

ISBN 978-65-990392-6-3

vezes não são percebidos na rotina produtiva. Com isso, torna-se possível reduzir a erosão hídrica, mitigar a degradação e aumentar a sustentabilidade das áreas agrícolas.

Figura 9 - Mapa de estimativa de perda de solo do talhão.



Fonte: Autores (2025)

4 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a análise topográfica detalhada permite compreender de forma mais eficiente o relevo do talhão, caracterizando atributos morfológicos, em especial a declividade, essenciais para interpretar o comportamento do escoamento superficial da água. A quantificação espacial das perdas de solo, superiores ou inferiores ao limite de tolerância, possibilitou direcionar a tomada de decisão para a implementação de práticas conservacionistas específicas, favorecendo a preservação do solo e a sustentabilidade das safras futuras.

Além disso, o emprego de ferramentas da Agricultura de Precisão e Digital, como drones, softwares de geoprocessamento e plataformas de modelagem, mostrou-se fundamental para a caracterização prática do terreno em áreas agrícolas. Esses recursos ampliam a capacidade de planejamento, otimizam as operações de manejo e contribuem diretamente para a conservação dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, assegurando a manutenção da capacidade produtiva e maior retorno econômico aos produtores.

ISBN 978-65-990392-6-3

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a empresa Tecgraf pela disponibilização da conta do AgroCAD®, que possibilitou a criação de forma eficiente dos mapas utilizados no trabalho.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507.

ALVES, J. P. I.; SILVA, S. A. Análise da Distribuição Espacial do Potencial Natural de Erosão de Quatro Áreas com Diferentes Topografias. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 3, p. 199-207, 2020.

BERTONI, I.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo.** São Paulo: Ícone Editora Ltda., 1990. 355p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo São Paulo**: Ícone, 2010. 360 p.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Restoration of eroded and degraded soils. In: BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Principles of soil conservation and management. **Dordrecht**: Springer, **2010.** p. 399–423. Disponível em: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-1-4020-8709-7_15. Acesso em: 7 set. 2025.

DAILY, Gretchen C. Restoring value to the world's degraded lands. **Science,** v. 269, n. 5222, p. 350–354, 21 jul. 1995. DOI: 10.1126/science.269.5222.350. Disponível em: https://www.science.org/doi/10.1126/science.269.5222.350. Acesso em: 7 set. 2025.

ENCK, B. F.; RODRIGUES, J. C. W.; HASSANE, A. L.; TEMBO, R. A.; CAMPOS, M. C. C.; SANTOS, L. A. C. dos; BRITO, W. B. de M. Impacto nos atributos do solo sob conversão de floresta para áreas cultivadas na região sul do Amazonas, Brasil. **Geografia Ensino & Pesquisa,** [S. l.], v. 24, p. e54, 2020. DOI: 10.5902/2236499443591. Disponível em: https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/43591. Acesso em: 7 set. 2025.

HUDSON, N. **Soil Conservation**. Ithaca, New York: Cornell University Press, 1977. 320p.

LANZANOVA, Mastrângelo Enivar. **Sistemas de culturas em plantio direto adaptados à pequena propriedade relacionados com a erosão e atributos de um Argissolo Vermelho**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/handle/1/3577. Acesso em: 7 set. 2025.

MORGAN, R. P. C. (2005). **Soil Erosion and Conservation.** 3ª ed., Wiley-Blackwell, Oxford.

OLDENMAN, L.R. **Global and regional databases for development of state land quality indicators**: the SOTER and GLASOD approach. Roma: FAO, 1995. Disponível em: https://www.fao.org/4/w4745e/w4745e0a.htm. Acesso em: 7 set. 2025.

Portela, J. C.; Bagatini, T.; Silva, M. L. N.; Silva, J. E. F. G. Perdas de solo e água por erosão hídrica após mudança de uso da terra. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p.

1247-1257, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000400013. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbcs/a/N7JdKHsWxm9rxfmw9h7JkGv/?lang=pt. Acesso em: 7 set. 2025.

RACHWAL, Marcos Fernando Gluck. O solo. In: SEMINÁRIO SOBRE EDUCAÇÃO AMBIENTAL INTEGRADA PARA MULTIPLICADORES, 2002, Colombo. Os seis elementos: água, ar, solo, flora, fauna, ser humano: trabalhos apresentados. Colombo: Embrapa Florestas, **Anais ...**, 2003. p. 73-110. (Embrapa Florestas. Documentos, 84). Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1013151/1/10solo.pdf. Acesso em: 7 set. 2025.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. rev. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65 p. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/330132/1/Sistema-de-avaliacao-da-aptidao-agricola-das-terras-1995.pdf. Acesso em: 7 set. 2025.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SARTORI, Martina; FERRARI, Emanuele; M'BAREK, Robert; PHILIPPIDIS, George; BOYSEN-URBANO, Kirste; BORRELLI, Pasquale; MONTANARELLA, Luca; PANAGOS, Panos. Remaining Loyal to Our Soil: A Prospective Integrated Assessment of Soil Degradation and Restoration. **Land Use Policy,** v. 123, p. 106384, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092180092300366X. Acesso em: 7 set. 2025.

TELLES, Tiago Santos. **Pesquisas quantificam prejuízos causados no solo pela erosão hídrica**. Curitiba: Federação da Agricultura do Estado do Paraná (FAEP), 13 out. 2021. Disponível em: https://www.sistemafaep.org.br/pesquisas-quantificam-prejuizos-causados-no-solo-pela-erosao-hidrica/. Acesso em: 7 set. 2025.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 68

CRIAÇÃO DE UM BANCO DE DADOS DE IMAGENS DE FRUTAS DE MAÇÃ GALA PARA O BRASIL

Creation of a gala apple fruit image database for Brazil

Alessandra Soares Sessi[1], Alessandro Fernando Machado Franco[2], Eduardo Carvalho da Silva[3], Lucas de Ross Marchioretto[4], Jovania Menezes Dias[5], Silvio Andre Meirelles Alves[6], Luciano Gebler[7]

[1] Embrapa Uva e Vinho, ORCID: 0009-0006-7724-4339, Email: alessandrasessi07@gmail.com
[2] Instituto Federal do Rio Grande do Sul – Campus Vacaria, ORCID: 0009-0001-0075-0771, Email: alemachadovacariar@gmail.com
[3] Embrapa Uva e Vinho, ORCID: 0009-0004-7917-5440, Email: carvahoeduardo26@gmail.com
[4] Embrapa Uva e Vinho, ORCID: 0000-0002-6677-4696, Email: lucasdeross@hotmail.com
[5] Instituto Federal do Rio Grande do Sul – Campus Vacaria, ORCID: 0000-0002-2625-9489, Email: jovania.dias@vacaria.ifrs.edu.br
[6] Embrapa Uva e Vinho, ORCID: 0000-0001-7088-8197, Email: silvio.alves@embrapa.br
[7] Embrapa Uva e Vinho, ORCID: 0000-0001-9622-5578, Email: luciano.gebler@embrapa.br

RESUMO

O desenvolvimento de sistemas de inteligência artificial, especialmente por meio de técnicas como *deep learning*, tem demonstrado elevado desempenho na análise e classificação de dados complexos. No contexto da fruticultura, o uso de bancos de dados de imagens tem sido útil para reconhecimento de padrões de presença de frutos em pomares, levando à construção de modelos que permitem a quantificação da produção por contagem de frutos. Entretanto, a construção de bancos de dados de alta qualidade, contendo imagens associadas a variáveis físicas como peso, altura, diâmetro e características visuais (cor, textura e forma), é fundamental para otimizar estes modelos preditivos. No caso de maçãs, essas informações permitem a identificação de padrões fenotípicos, apoiando atividades como classificação de frutos, monitoramento de qualidade e melhoramento de processos produtivos, além de melhorar a logística da colheita. O objetivo do trabalho foi estruturar um banco de imagens rotulado, contendo informações de diâmetro, altura e peso dos frutos associado a fotos de 3 diferentes faces de frutos, visando futura obtenção de modelos preditivos de produtividade para a colheita baseados em peso e diâmetro de frutos e não somente contagem de frutos.

Palavras-chave: Banco de dados; Maçãs; Classificação; *Deep learning*.

ABSTRACT

The development of artificial intelligence systems, especially through techniques such as deep learning, has shown high performance in the analysis and classification of complex data. In the context of fruit growing, the use of image databases has been useful for recognizing patterns of fruit presence in orchards, leading to the construction of models that allow production quantification by fruit counting. However, the construction of high-quality databases containing images associated with physical variables such as weight, height, diameter, and visual characteristics (color, texture, and shape) is essential to optimize these predictive models. In the case of apples, this information allows the identification of phenotypic patterns, supporting activities such as fruit classification, quality monitoring, and improvement

ISBN 978-65-990392-6-3

of production processes, in addition to improving harvest logistics. The objective of this work was to structure a labeled image database containing information on diameter, height, and weight of fruits associated with photos of 3 different fruit faces, aiming at future obtaining of predictive productivity models for harvest based on fruit weight and diameter and not only fruit counting.

Keywords: Database; Apples; Classification; *Deep learning*.

1 INTRODUÇÃO

A produção de maçãs representa uma das principais atividades frutícolas no sul do Brasil, sendo a cultivar Maxi Gala amplamente cultivada devido à sua adaptabilidade e qualidade comercial. Atualmente os dois estados do sul são os maiores produtores brasileiros de frutos de maçã. As cultivares que se consolidaram no Brasil são clones que pertencem aos grupos Gala e Fuji (PETRI et al., 2011). A caracterização fenotípica dos frutos desempenha um papel essencial na avaliação do desempenho agronômico de diferentes sistemas de cultivo e no suporte ao melhoramento genético.

Análises detalhadas das características físicas e morfológicas dos frutos se tornam indispensáveis para a compreensão do comportamento da cultivar em diferentes ambientes e condições de manejo. Entretanto, atualmente há falta de bancos de dados de imagens com frutos de maçã característicos do Brasil, sendo necessária à sua construção e disponibilização para avanços na área de visão computacional aplicada ao monitoramento e previsibilidade da produção. Portanto, a padronização das avaliações, aliada ao uso de tecnologias como câmeras profissionais e ferramentas digitais de medição, contribui para a geração de dados confiáveis e comparáveis entre estudos.

O desenvolvimento de modelos preditivos de frutos para a colheita tem sido um grande avanço no uso da visão computacional e nos modelos de *deep learning*, porém estão restritos à contagem dos frutos ou, quando há o realce dos mesmos na planta, à criação de uma figura geométrica com raio conhecido que contabiliza o fruto como uma unidade. Com bancos de dados mais detalhados, é possível vincular este raio conhecido, ou a pixelização da fruta para obtenção de uma área real na imagem, com dados como peso, diâmetro e altura dos alvos, permitindo gerar relatórios pelo peso real da colheita ou seu volume a ser colhido e acomodado nos *bins* de armazenamento, ao invés do atual trabalho de avaliação pela média dos frutos contados.

ISBN 978-65-990392-6-3

A presente pesquisa teve como objetivo criar um banco de dados de imagens ao documentar características fenotípicas de frutos da cultivar Maxi Gala, oriundos de dois pomares distintos. A partir da coleta e organização sistemática dos dados físicos (peso, altura e largura dos frutos) e das imagens, pretende-se fornecer uma base sólida para estudos futuros, incluindo aplicações em reconhecimento de padrões por meio de técnicas de visão computacional e inteligência artificial. A abordagem adotada reforça a importância de integrar métodos tradicionais de análise com inovações tecnológicas, ampliando o escopo e a precisão das avaliações em fruticultura de clima temperado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo tem como base frutos obtidos em dois pomares da cultivar Maxi Gala, implantado em setembro de 2011, nomeados Fitotecnia e Gestão, na Estação Experimental de Fruticultura de Clima Temperado da Embrapa Uva e Vinho, em Vacaria–RS (um dos dez Distritos Agrotecnológicos do Projeto Semear Digital Embrapa, 2024), conduzido no sistema de líder central, com espaçamento de 4 metros entre linhas e 1 metro entre plantas.

2.2 Coleta, processamento e análise de dados

A coleta de dados foi conduzida em um conjunto amostral de 92 plantas distribuídas na forma de *grid* regular, visando garantir a representatividade da variabilidade fenotípica. Todas as frutas presentes em cada uma das plantas foram colhidas manualmente no estádio de maturidade fisiológica, identificado com base em critérios visuais e parâmetros técnicos, na data de 11 de fevereiro de 2025. O período de colheita é definido através do monitoramento de alguns parâmetros de maturação como firmeza de polpa, índice de amido e teor de sólidos solúveis (SS) (RUTKOWSKI et al., 2008). Após a colheita, os frutos foram acondicionados em sacos vazados de polietileno devidamente identificados com o código de cada planta de origem. As amostras foram armazenadas sob condições controladas de refrigeração, a uma temperatura de +0,4 °C, até o momento da realização das avaliações e dos registros fotográficos.

As avaliações ocorreram entre fevereiro e abril. Inicialmente, os frutos foram numerados individualmente e submetidos à aferição de altura e diâmetro com um paquímetro digital da

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque/RS · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

marca Insize. Posteriormente, cada maçã foi pesada individualmente utilizando uma balança de precisão da marca Shimadzu. A coleta dos dados foi realizada manualmente, com registro em formato físico (folhas de papel) que, posteriormente, estão sendo digitalizadas para em arquivos .XLSX, utilizando-se tecnologia OCR (*Optical Character Recognition*) com apoio de tecnologias de inteligência artificial, a fim de alimentar o *dataset* rotulado, a ser construído em linguagem SQL, produto final deste trabalho, conforme sugerido em MEMON et al. (2020).

Para o registro fotográfico, os frutos foram dispostos a uma distância regular de 50 cm da objetiva da câmera, com um fundo branco. Cada fruto foi fotografado sob três ângulos distintos, visando capturar características morfológicas relevantes. O equipamento utilizado foi uma câmera fotográfica profissional da marca Cannon, calibrada para assegurar uniformidade na resolução e qualidade das imagens. Foi adotado um cuidado especial com a resolução e a pixelização das imagens, sendo um aspecto crítico para aplicações em inteligência artificial, pois imagens de baixa resolução ou excessivamente pixeladas podem comprometer a capacidade dos algoritmos de reconhecer padrões sutis.

A partir destas informações obtidas, foi gerado um *dataset* rotulado e um repositório de imagens das frutas para aplicação com os futuros testes para validação do banco de dados utilizando linguagem Python, quando será utilizado uma rede neural Yolo V5, em aplicações simuladas, buscando analisar as imagens e identificar corretamente suas dimensões e correlacionar com peso. Para que se obtenha um resultado mais preciso, as informações da tabela serão relacionadas com as imagens e a rede neural será treinada com uma amostra de pelo menos 2 mil linhas da base de dados (TERVEN et al., 2023).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estruturação do banco de dados

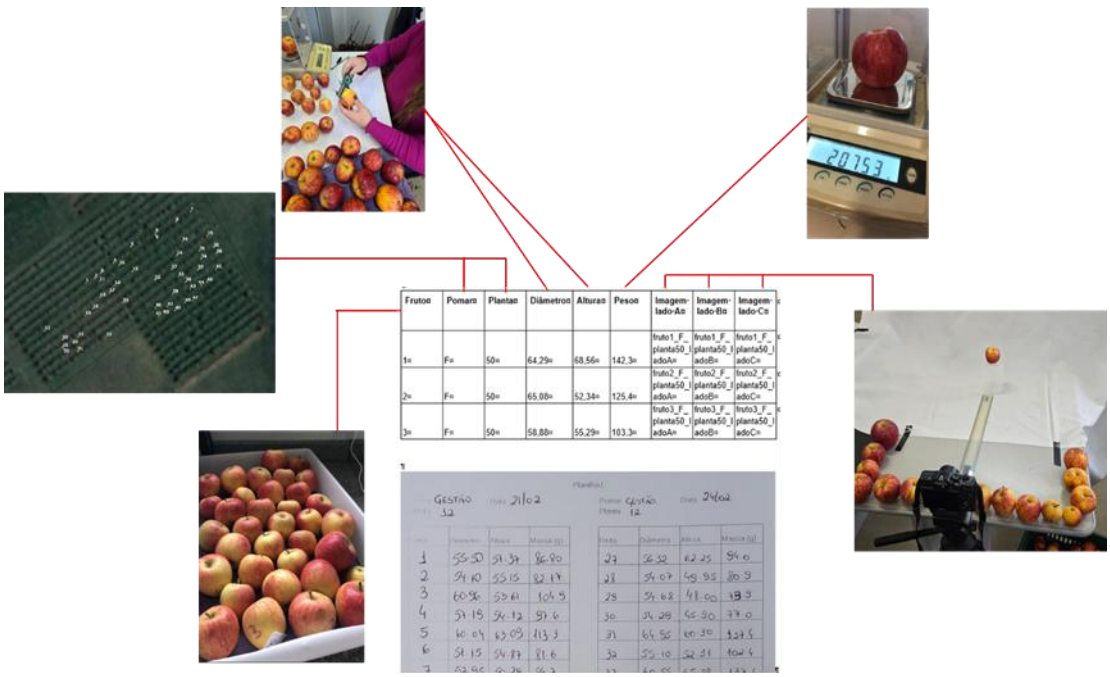
Os dados utilizados foram obtidos após a colheita das maçãs. As informações foram inicialmente registradas em fichas de papel após transporte dos frutos para o laboratório da Embrapa. Após a extração das medidas, cada fruto foi identificado com um número que zera a contagem depois de todos os frutos de uma planta terem sido pesados e medidos. Os dados obtidos do trabalho de laboratório, registrados manualmente, em uma tabela de texto, e posteriormente convertidas para tabela em arquivo Excel/.XLSX foi convertida na base de

ISBN 978-65-990392-6-3

dados como um *dataset* rotulado utilizando linguagem Python através da biblioteca Pandas, ordenado em cada linha com as informações registradas da seguinte maneira: “ID_fruto,” “N_fruto”, “Pomar”, “N_planta”, “Diametro (mm)” “Altura (mm)” e “Peso (g)”.

Foi adicionado o atributo “ID_fruto” como identificador geral de todas as entradas do *dataset*. O atributo “N_fruto” se refere ao número identificador anotado antes nas fichas de papel como “Fruto”, mantendo-se o padrão de identificação de frutos por planta. Para o atributo “Pomar” manteve-se o nome, porém o dado atribuído ao atributo é a inicial do nome de cada pomar: “F” para “Fitotecnia” e “G” para “Gestão”. “N_planta” refere-se ao campo “Planta” da ficha de coleta de dados, e também foi mantido o padrão de identificação numérica para cada planta. Os atributos “Diametro (mm)”, “Altura (mm)”, e “Peso (g)” recebem valores das medidas de diâmetro, altura e peso, respectivamente, finalizando com três colunas contendo links de endereçamento das imagens capturadas de três ângulos diferentes de cada fruto (Figura 1).

Figura 1 – Passos necessários e esquema de criação do banco de imagens de frutos de maçã Gala no Brasil.



Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

3.2 Discussão

Para a confecção deste banco de dados fora tomadas 21.181 fotos sendo que cada conjunto de 3 imagens compõe uma linha do banco de dados, resultado das 7.063 frutas, que compõe as entradas. Após a fase de coleta de dados e montagem do *dataset*, houve o teste de resiliência e robustez do banco de dados, verificando a consistência na extração de informações (Figura 2).

Figura 2 – Passos necessários e esquema de criação do banco de imagens de frutos de maçã Gala no Brasil.

```
# Resumo das informações estruturais do DataFrame

df.info()

print("Dimensões:", df.shape)
print("\nValores ausentes por coluna:")
print(df.isna().sum())
```

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
RangeIndex: 7063 entries, 0 to 7062
Data columns (total 7 columns):
 #   Column         Non-Null Count  Dtype
---  ------         --------------  -----
 0   ID_fruto       7063 non-null   int64
 1   N_fruto        7063 non-null   int64
 2   Pomar          7063 non-null   object
 3   N_planta       7063 non-null   int64
 4   Diametro (mm)  7063 non-null   float64
 5   Altura (mm)    7063 non-null   float64
 6   Peso (g)       7063 non-null   float64
dtypes: float64(3), int64(3), object(1)
memory usage: 386.4+ KB
Dimensões: (7063, 7)

Valores ausentes por coluna:
ID_fruto         0
N_fruto          0
Pomar            0
N_planta         0
Diametro (mm)    0
Altura (mm)      0
Peso (g)         0
dtype: int64
```

Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

Para o passo seguinte, a aplicação de classificação com Inteligência Artificial, decidiu-se utilizar o YOLO V5, reconhecido para o trabalho com imagens (TERVEN et al., 2023). Nesta próxima fase, o objetivo será correlacionar a área das frutas com peso e volume, permitindo avaliações mais precisas na época de colheita e planejamento mais detalhado na logística de uso e movimentação de *bins* e na alocação de pessoas. Confirmado o sucesso da aplicação, prevê-se disponibilizar o banco para uso do projeto Semear Digital (EMBRAPA, 2024), a fim de produzir novos aplicativos, principalmente relacionados à logística de colheita e avanços na visão computacional de máquinas agrícolas.

4 CONCLUSÃO

A criação de um banco de dados de imagens de maçãs Gala com informações detalhadas de peso, diâmetro, altura e imagens de múltiplos ângulos tem potencial de representar um avanço significativo para a fruticultura brasileira. Este trabalho possibilitará o desenvolvimento de modelos preditivos mais precisos baseados em *deep learning*, desde que devidamente validado, superando as limitações dos métodos atuais de contagem de frutos.

A integração de dados físicos e visuais poderá impactar positivamente em várias atividades como facilitar a logística de colheita, o monitoramento de qualidade e o planejamento produtivo. Como limitação, destaca-se a dependência de condições controladas para coleta de dados, o que pode influenciar a generalização dos modelos. Futuros trabalhos poderão expandir o banco com mais variedades e condições de cultivo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Embrapa (SEG 20.23.03.005.00.00), FAPERGS (proc. 24/2551-0001342-3) e FAPESP (Proc. 2022/09319-9) pelo financiamento.

REFERÊNCIAS

EMBRAPA. **Centro de Ciência para o Desenvolvimento em Agricultura Digital**. São Paulo, 2024. Disponível em: https://www.semear-digital.cnptia.embrapa.br/. Acesso em: 24 abr. 2025.

ISBN 978-65-990392-6-3

MEMON, J.; SAMI, M.; KHAN, R. A.; UDDIN, M. Handwritten Optical Character Recognition (OCR): A Comprehensive Systematic Literature Review (SLR). **IEEE Access**, v. 8, p. 142642-142668, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3012542.

PETRI, J. L. et al. **Cultivares de macieira**. In: EPAGRI. **A cultura da macieira**. Florianópolis: EPAGRI, 2011. p. 49-76.

RUTKOWSKI, K. et al. **Métodos para determinação do ponto de colheita em maçãs**. Revista Brasileira de Fruticultura, v. 30, n. 2, p. 482-489, 2008.

TERVEN, J.; CÓRDOVA-ESPARZA, D.-M.; ROMERO-GONZÁLEZ, J.-A. A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. **Machine Learning and Knowledge Extraction**, v. 5, p. 1680-1716, 2023. DOI: 10.3390/make5040083.

ISBN 978-65-990392-6-3



ÁREA TEMÁTICA: MÁQUINAS AGRÍCOLAS DESENVOLVIDAS PARA AGRICULTURA DE PRECISÃO

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 69

A SEMENTE COMO FATOR DE INFLUÊNCIA NA SINGULAÇÃO

The seed as a factor of influence in singulation

João Batista da Silva Santos[1]; Vinicius Kaster Marini[2]; Marconi Ribeiro Furtado[3]

[1] UFSM, Mestrando em Agricultura de Precisão, Av. Roraima, 1000 - Camobi, Santa Maria - RS, 97105-000, joao-santos.2@acad.ufsm.com.br;
[2] Ph.D. Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia - Av. Roraima, 1000, Prédio 10, Sala 402G 97105-900, Santa Maria – RS, Brasil. vinicius.marini@ufsm.br;
[3] UFV, Dr. Departamento de Engenharia Agrícola, Viçosa - MG, Brasil. marconi.furtado@ufv.br;

RESUMO

Diversos fatores podem ter influência na capacidade de singulação dos mecanismos dosadores de sementes, como por exemplo a própria semente a ser singulada no momento do plantio, pois, devido as variações como peso, formas e tamanhos podem apresentar resultados não satisfatórios. Diante do exposto, visando a importância da padronização biométrica das sementes, o objetivo deste foi avaliar a influência das características biométricas de oito diferentes amostras de sementes de milho no desempenho da capacidade do dosador singular e acondicionar as mesmas nos alvéolos do disco utilizando o dosador Titanium. O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado (DIC) com 8 tratamentos formado pelos diferentes híbridos e 4 repetições para cada tratamento. Os dados foram avaliados por meio de análise de variância, para o fator qualitativo, as médias foram comparadas utilizando o teste de Tukey adotando-se o nível de 1% de probabilidade e correlação de Pearson para todas as variáveis. Conclui-se que os diferentes híbridos e suas características biométricas utilizando um dosador mecânico é um fator óbvio de interferência na capacidade de singulação do dosador, sendo neste trabalho o fator PMS o que mais afetou a singulação seguido pela variação do comprimento e da largura das sementes, sendo de grande relevância o conhecimento para aprimoração de desenvolvimento de novos mecanismos dosadores.

Palavras-chave: Milho. Plantabilidade. Dosadores de Sementes.

ABSTRACT

Several factors can influence the singulation capacity of seed metering mechanisms, such as the seed itself, which can produce unsatisfactory results due to variations in weight, shape, and size. Given the above, and given the importance of seed biometric standardization, the objective of this study was to evaluate the influence of the biometric characteristics of eight different corn seed samples on the performance of the single metering device and to package them in the disc alveoli using the Titanium meter. A completely randomized experimental design (CRD) was adopted, with eight treatments consisting of different hybrids and four replicates for each treatment. Data were evaluated using analysis of variance. For qualitative factors, means were compared using Tukey's test, adopting a 1% probability level, and Pearson's correlation for all variables. It is concluded that the different hybrids and their biometric characteristics using a mechanical meter are an obvious factor of interference in the singulation capacity of the meter, being in this work the PMS factor that most affected the singulation followed by the variation of the length and width of the seeds, being of great relevance the knowledge for improvement of development of new metering mechanisms.

Keywords: Corn. Plantability. Seed Dosers.

1 INTRODUÇÃO

O brasil é um dos principais produtores de milho (*Zea mays* L.). Segundo estimativas, o

ISBN 978-65-990392-6-3

país na safra de grãos 2024/25 tem estimativa recorde de 330,3 milhões de toneladas, representando um crescimento de 32,6 milhões de toneladas na comparação com o ciclo 2023/24 sendo somente a cultura do milho estimada em 124,7 milhões de toneladas, crescimento de 9 milhões de toneladas em relação ao ciclo passado. A estimativa da safra de grãos se dá por uma maior área plantada, prevista em 81,7 milhões de hectares, com incorporação de 1,7 milhão de hectares em relação à 2023/24, quanto às condições climáticas favoráveis registradas na primeira safra nas principais regiões produtoras.

Atualmente, com a grande inovação das indústrias no desenvolvimento de tecnologias focadas em semeadura precisa das grandes culturas, novos produtos vêm surgindo cada dia mais no mercado afim de melhorar a eficiência da plantabilidade aumentando a produtividade e consequentemente reduzindo os custos de insumos.

Segundo Duarte (2015), o desenvolvimento de tecnologias apropriadas focadas no cultivo do milho safrinha, juntamente com o trabalho dos produtores rurais, proporcionou grande aumento da produtividade média brasileira de grãos, que dobrou, nos últimos 20 anos, para cerca de 5 t ha^{-1}.

A dosagem de sementes é realizada nas semeadoras por um sistema dosador de sementes, existindo no mercado uma ampla variedade de mecanismos, que vão desde os sistemas convencionais, pneumático, titanium, Top X3, Plantisystem entre outras novas tecnologias. Sua adequação do conjunto mecanizado no processo de semeadura é de relativa importância para se obter a máxima eficiência a fim de evitar perdas de sementes e insumos (ALMEIDA et al., 2010).

De acordo com MIALHE (2012), as semeadoras de precisão mais utilizadas no Brasil, são as que apresentam sistemas dosadores: com discos alveolados horizontais, e com dosadores pneumáticos de sucção (vácuo). Para REIS (2015), o sistema dosador de sementes é responsável pelo acondicionamento e pelo bom desempenho de uma semeadora adubadora quanto à precisão de semeadura, no estabelecimento das plantas.

Conforme aponta Anghinoni (2019), as semeadoras modernas para o plantio de grandes culturas utilizam sistemas de vácuo ou mecânicos que permitem ajustes precisos, porém, a manutenção adequada e a calibração frequente desses sistemas são imprescindíveis para garantir uma boa precisão e eficiência no campo.

O dosador de discos horizontais Titanium da J. Assy, considerado um dosador do tipo disco horizontal alveolado, porém, com maior aporte em tecnologia o torna mais eficiente na singulação e consequentemente na distribuição de sementes. Para Bottega et al. (2014), e Laurino et al. (2017), mesmo em velocidades como a de 6 km h^{-1}, o sistema Titanium entregou mais uniformidade na profundidade e estande final de plantas em relação ao disco horizontal convencional.

A cultura do milho possui particularidades distintas na formação de sementes, sendo que na espiga as sementes formadas próximo à base possuem formato achatado e sementes formadas no ápice da espiga, possuem formato arredondado. Nas unidades de beneficiamento de sementes estas passam por classificação através de peneiras e cilindros alveolados específicos (SCHMIDT, 2019).

Para Wang et al. (2023), as características geométricas das sementes de milho são cruciais para realização de experimentos de desempenho e a análise de dispositivo de dosagem de sementes. Além disso, Shi et al. (2023) destaca-se a importância de compreender as propriedades da variedade de milho para aumentar a produtividade da colheita, melhorar as técnicas de manuseio e melhorar os projetos de máquinas e equipamentos agrícolas, contribuindo assim para práticas agrícolas sustentáveis.

Segundo Trogello et al. (2013) as sementes de milho passam por processo de classificação comercial na Unidade de Beneficiamento de Sementes (UBS), onde são

ISBN 978-65-990392-6-3

submetidas à passagem por peneiras de crivos oblongos para separação por espessura e crivos redondos para separação por largura, além de dispositivo "*trieur*" para classificação por comprimento. A nomenclatura das peneiras é formada por algarismos e letras, que combinados buscam descrever as características fenotípicas das sementes.

De acordo com a empresa Bayer (2022) e Batistella et al. (2002) na região da base da espiga de milho, formam-se sementes mais pesadas, seguidas pelas da porção central e da apical, resultando em sementes de diferentes pesos. Com relação a espessura da semente, essa está relacionada com a pressão exercida por uma cariopse contra as outras durante o enchimento dos grãos, levando à formação de sementes achatadas no terço médio da espiga e de sementes arredondadas na base e no ápice, locais onde a pressão entre cariopses é menor. Sendo assim, em uma mesma espiga de milho, pode ocorrer sementes de diferentes tamanhos e formas. O tamanho de uma semente é dependente de suas dimensões, ou seja, comprimento, largura e espessura podendo ser calculada a sua esfericidade.

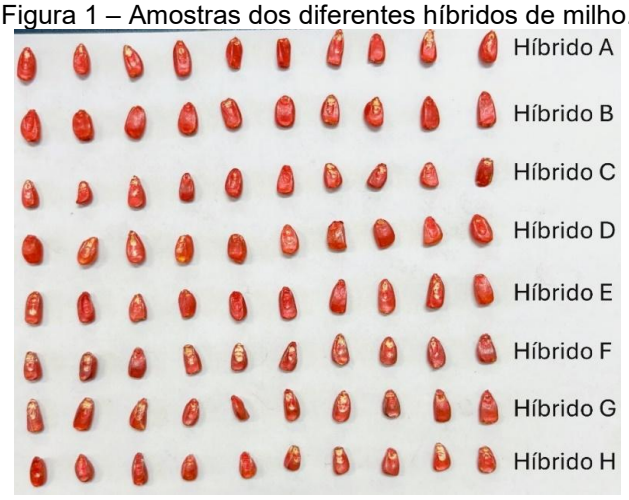
Do ponto de vista dos fatores de influência na plantabilidade do milho e no desenvolvimento de novas tecnologias, o formato variável das sementes desta cultura torna-se desafiadora obter uma ótima capacidade de singulação nos mecanismos dosadores de sementes para que não haja distribuição de sementes duplas e falhas no campo ocorrendo competição nutricional reduzindo a produtividade. Os fatores que afetam a singulação incluem a qualidade física das sementes (tamanho, formato e peso), as condições de ajuste da semeadora (pressão de vácuo, disco de plantio, velocidade de avanço) e as condições do solo (Pereira et al., 2021).

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência das características biométricas de oito diferentes amostras de sementes de milho no desempenho da capacidade do dosador singular e acondicionar as mesmas nos alvéolos do disco utilizando o dosador Titanium.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no laboratório de pós-venda da unidade fábril da empresa J. Assy, localizada no município de Caldas Novas, Goiás (Latitude 17°43'32" S; Longitude 48°37'19" W; Altitude: 723,37 m). Foram utilizadas sementes de oito híbridos comerciais de milho da empresa Bayer (Figura 1), com características dimensionais distintas. Os discos dosadores foram ajustados em função da geometria e dimensões das sementes. Para todos os híbridos foi ajustada uma taxa de semeadura de 3 sementes por metro.

Figura 1 – Amostras dos diferentes híbridos de milho.



Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

As análises foram divididas em duas etapas, na primeira as amostras dos híbridos denominados de Híbrido A, Híbrido B, Híbrido C, Híbrido D, Híbrido E, Híbrido F, Híbrido G e Híbrido H foram submetidas ao ensaio de semeadura em uma bancada simuladora de dosagem e na segunda foram realizados testes dimensionais para avaliação das características biométricas das amostras de sementes.

Foi utilizada uma bancada de testes dotada de mecanismo dosador acionado por conjunto motor redutor de 0,33 cv de potência e 70 rpm de rotação Weg Cestari Geremia Trifásico G101E (Weg, Monte Alto, SP, Brasil), base fundida adaptadora para o dosador mecânico convencional, controlador curtis para controlar a quantidade de RPM do disco de sementes, uma chave geral para ligar e desligar o sistema e um dosador Titanium com discos de 28 alvéolos (Figura 2).

Figura 2 – Bancada de simulação e dosador mecânico de precisão Titanium.



Fonte: Autores (2025)

Para cada amostra de híbridos, foram avaliados 308 alvéolos, realizando 4 repetições de cada amostra, assim determinou-se os índices de singulação (alvéolos com sementes), Falhos (alvéolos sem sementes), Duplos (alvéolos com mais de uma semente).

Para realização da análise dimensional das sementes foi utilizado um paquímetro digital com precisão de 0,05 mm, avaliando o comprimento, a largura e a espessura de uma amostra composta por 20 sementes de cada híbrido. Para determinação do peso de mil sementes, foram utilizadas subamostras de 1000 sementes, com 4 repetições para cada híbrido. Logo após as mensurações, foi calculada a esfericidade das sementes, de acordo com a Equação 1, proposta por Karayel (2009).

$$Ø = \frac{(L.W.T)1/3 \times 100}{L} \quad (1)$$

(KARAVEL, 2009)

Em que:
Ø é a esfericidade (%);
L, W e T referem-se ao comprimento, largura e espessura da semente (mm), respectivamente.

ISBN 978-65-990392-6-3

Calculou-se a razão de aspecto de todos os híbridos de acordo com a Equação 2:

$$RA = L / W \quad (2)$$

Em que: L e W referem-se ao comprimento e largura da semente (mm), respectivamente.

Utiizou-se o dosador de discos alveolados horizontal Titanium, da fabricante J. Assy (Figura 3), o dosador é desenvolvido para apresentar simplicidade na sua utilização, possui alta precisão e praticidade. Seu maior destaque está na característica do altíssimo percentual de redução de duplos e falhos devido a sua forma construtiva onde se tem 4 poliflows (raspadores de sementes) para eliminação dos erros de dosagem e melhoria na singulação e uma escova flex para expulsar as sementes presas nos alvéolos do disco.

Figura 3. Dosador mecânico Titanium.



Fonte: J. ASSY (2025)

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado (DIC) com 8 tratamentos formado pelos diferentes híbridos e 4 repetições para cada tratamento. Os dados foram avaliados por meio de análise de variância, as médias foram comparadas utilizando o teste de Tukey adotando-se o nível de 1% de probabilidade. A associação entre as variáveis respostas foram avaliadas por meio da correlação de Pearson, com nível de 5% de probabilidade. Para as análises utilizou-se o software Sisvar.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise de variância (Tabela 1) indicou efeito significativo do lote de sementes em todas as variáveis dimensionais analisadas, evidenciando as particularidades dos híbridos e o potencial de afetar o processo de dosagem. O híbrido D apresentou maiores médias para as variáveis mM(g) (261,5 g), Esfericidade (95,23%), espessura (4,08 mm) e largura (6,99 mm), já o híbrido C apresentou menores médias para variáveis sendo mM(g) (182,75g), Esfericidade (63,09%) e espessura (3,10 mm). Ainda, o híbrido D apresentou menor média para a razão de aspecto da semente.

Shi et al. (2023), avaliando diversos formatos de sementes de milho comerciais da

ISBN 978-65-990392-6-3

china, conclui que os formatos das sementes de milho afetam o comportamento de rolamento das sementes, constituindo um fator crítico no fluxo de milho. Esse fator pode interferir diretamente na capacidade de singulação dos mecanismos dosadores.

Tabela 1 – Resumo da análise de variância das características biométricas dos híbridos.

FV	GL	Quadrado médio					
		CMS	LMS	EMS	Esfer	mM(g)	R/A
Híbrido	7	1,38**	0,56**	0,55**	532,75**	3394,53**	0,06**
Resíduo	24	0,25	0,02	0,05	28,21	1,18	0,0083
Total	31						
CV (%)		6,31	5,71	11,77	15,79	13,23	5,27
Híbrido A		11,69a	6,05c	3,13c	63,31d	208d	1,93c
Híbrido B		11,74a	6,97a	3,27c	76,09bc	244,5b	1,68abc
Híbrido C		10,08b	6,09c	3,10c	63,09d	182,75f	1,65ab
Híbrido D		11,08ab	6,99a	4,08a	95,23a	261,5a	1,58a
Híbrido E		11,63a	6,20c	3,10c	64,12cd	211,5c	1,87bc
Híbrido F		11,44a	6,69ab	3,50bc	78,20b	192,75e	1,71abc
Híbrido G		11,62a	6,56b	3,61abc	79,09b	191,25e	1,77abc
Híbrido H		10,75ab	6,62b	3,84ab	84,99ab	183,5f	1,62ab

Legenda: FV, fonte de variação; GL, grau de liberdade; CV, coeficiente de variação da análise de variância; CMS, comprimento médio de sementes (mm); LMS, largura média de sementes (mm); EMS, espessura média da semente (mm); Esfer, esfericidade da semente (%); mM(g), massa de mil grãos (g) e R/A; razão de aspecto. Letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferenças estatísticas dos fatores de variação estudados. ** indica diferença significativa a 1% de probabilidade.
Fonte: Autores (2025).

Os híbridos avaliados afetaram a qualidade do processo de dosagem (Tabela 2), o que reforça que o processo de dosagem não depende exclusivamente da configuração do mecanismo dosador. O Híbrido D apresentou o melhor desempenho em Singulação (95,40%), enquanto os Híbridos F, G e H apresentam maiores índices de Falhos e Múltiplos, o híbrido G com pior desempenho de singulação (83,52%). Para os diferentes híbridos, nota-se que sementes que possuíam maior mM(g) se acomodavam melhores nos orifícios do disco horizontal, não deixando espaço para que possa ocorrer orifícios falhos. Pereira et al. (2021), avaliando três formatos de sementes (oblonga, intermediária e redonda) também observa que as características biométricas de cada híbrido também influência no desempenho de dosagem do mecanismo dosador, salientando que sementes mais arredondas possui um melhor preenchimento do furo do disco.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 2 – Resumo da análise de variância da dosagem de sementes.

FV	GL	Quadrado médio		
		SINGULAÇÃO (%)	FALHOS (%)	MÚLTIPLOS (%)
Híbrido	7	74,86**	47,18**	12,74**
Resíduo	24	2,57	2,03	1,49
Total	31			
Híbrido A		91,25b	2,45bc	6,15bc
Híbrido B		94,25ab	1,95c	3,82c
Híbrido C		91,40b	1,77c	6,8bc
Híbrido D		95,40a	0,87c	3,72c
Híbrido E		87,40c	5ab	7,55b
Híbrido F		85,80cd	2,45bc	11,7a
Híbrido G		83,52d	3,07bc	13,4a
Híbrido H		85,77cd	6,25a	7,95b

Legenda: FV, fonte de variação; GL, grau de liberdade. letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferenças estatísticas dos fatores de variação estudados. ** indica diferença significativa a 1% de probabilidade.

Fonte: Autores (2025)

A Tabela 3, apresenta os coeficientes de correlação de Pearson e a matriz de p-valores calculados entre as diferentes variáveis. As colunas representam os grupos para os quais as correlações foram calculadas. As linhas indicam os pares de variáveis sendo correlacionados.

Tabela 3. Análise de correlação de Pearson e P-valores (p<0,01).

	CMS_(mm)	LMS_(mm)	EMS_(mm)	Ømm	mM_(g)	Singulação	Múltiplos	Falhos
CMS_(mm)	-	0,12	-0,01	0,03	0,28	-0,12	0,06	0,16
LMS_(mm)	0,13	-	0,58**	0,79**	0,57**	0,25**	-0,15	-0,27
EMS_(mm)	-0,01	0,58**	-	0,95**	0,24	-0,02	0,01	0,05
Ømm	0,03	0,79**	0,95**	-	0,39**	0,09	-0,06	-0,07
mM_(g)	0,28	0,57**	0,24	0,39**	-	0,74**	-0,66**	-0,44**
Singulação	-0,12	0,26	-0,02	0,09	0,76**	-	-0,89**	-0,62**
Múltiplos	0,06	-0,15	0,01	-0,06	-0,66**	-0,89**	-	0,19
Falhos	0,16	-0,27	0,05	-0,07	-0,56**	-0,62**	0,19	-
R/A	0,72**	-0,60**	-0,42	-0,53**	-0,16	-0,26	0,13	0,31

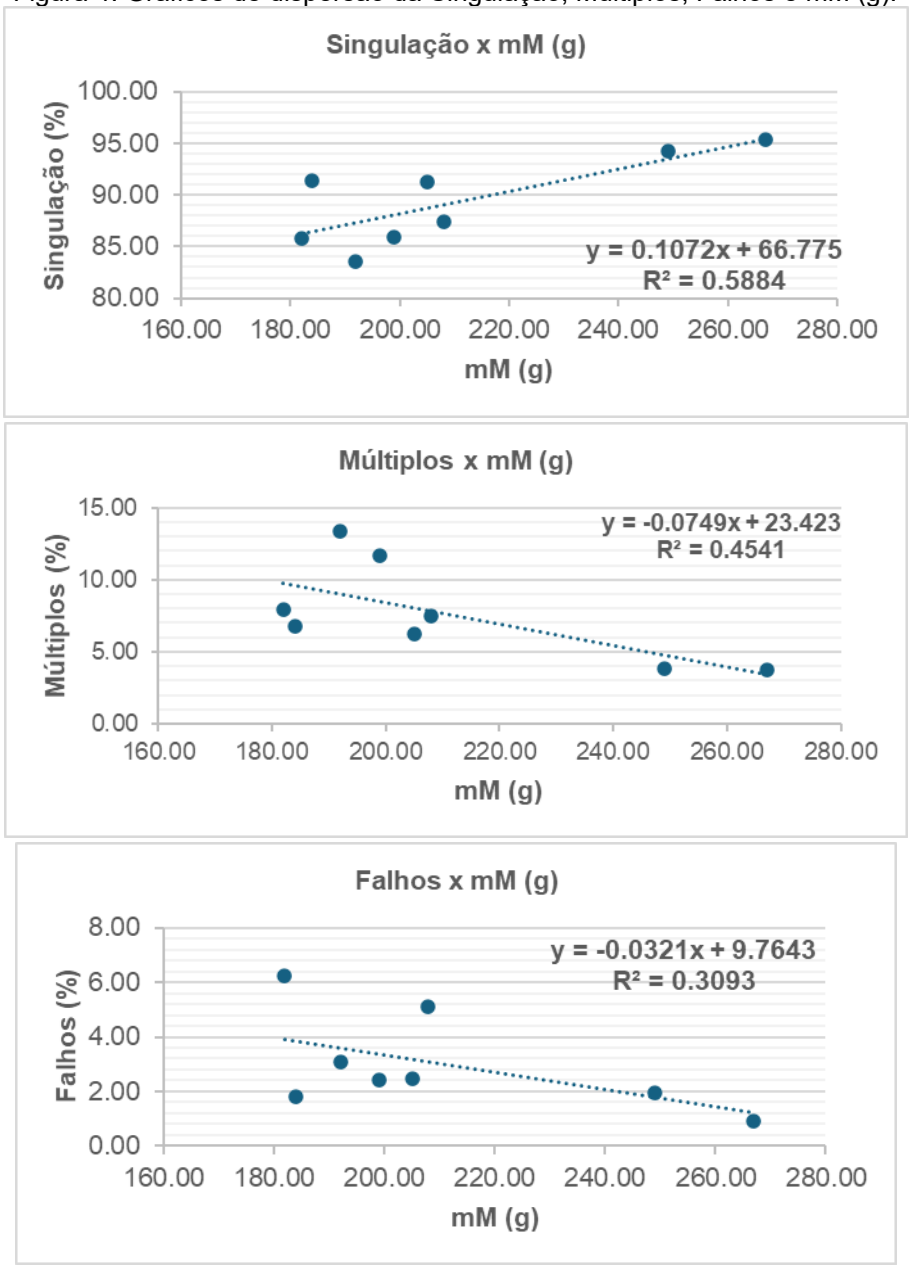
Legenda: CMS, comprimento médio de sementes; LMS, largura média de sementes; EMS, espessura média da semente; Ø, esfericidade da semente; mM(g), massa de mil grãos e R/A, razão de aspecto das sementes. ** significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Autores (2025)

A principal variável da característica biométrica dos híbridos que afetaram o desempenho do mecanismo dosador, de acordo com a correlação foi a mM(g), apresentando uma correlação positiva forte (0,76) com a "Singulação", correlação negativa moderada (-0,66) com "Múltiplos" e uma correlação negativa moderada (-0,56) com "Falhos", indicando que os híbridos que tiveram maior massa de mil sementes tiveram uma captura melhor nos alvéolos e os híbridos com menores massa maior quantidade de múltiplos e falhos, conforme podem ser vistos na Figura 4.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 4. Gráficos de dispersão da Singulação, Múltiplos, Falhos e mM (g).



Fonte: Autores (2025).

A esfericidade das sementes apresentou alta correlação positiva com a LMS e EMS - Largura e Espessura média das sementes, indicando que quanto maior essas dimensões maiores a padronização do formato da semente, porém não ouve efeito sobre a performance do dosador, sendo não significativa porque não se aplica a semente de milho, pois o formato da semente é trapezoidal e não esférico.

A LMS – Largura média das sementes, tem tendência a apresentar falhos e duplos, pois quanto menor a largura da semente maior a dificuldade de ser alocada dentro dos alvéolos do disco dosador, gerando alvéolos com múltiplos quando posicionada uma semente do lado da outra e falhos quando a semente não se posiciona de forma adequado e a caixa propulsora retira a semente do alvéolo. Já para a EMS - Espessura média das sementes não foi observado correlação.

A RA - razão de aspecto das sementes, também obtiveram forte correlação negativa significativa com a espessura e as medidas de esfericidade das sementes, e correlação

ISBN 978-65-990392-6-3

positiva significativa muito forte com o CMS – Comprimento médio de sementes, indicando que as caraterísticas biométricas dos híbridos têm influência nos formatos dos híbridos.

4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados da análise estatística e dos testes de correlação, conclui-se que os diferentes híbridos por possuírem medidas e biometrias diferentes é um fator óbvio de interferência na capacidade de singulação do dosador, sendo o neste trabalho o fator PMS o que mais afeta a singulação, quando maior o PMS melhor a singulação no dosador avaliado.

O formato das sementes de milho afeta o comportamento de rolamento das sementes, constituindo um fator crítico no fluxo de milho dificultando seu posicionamento nos orificios dos discos horizontais, mesmo em dosadores mecanicos com mais precisão.

O estudo destaca a importância da compreensão das propriedades da variedade de milho para aprimorar o projeto de máquinas e equipamentos agrícolas, contribuindo assim para práticas agrícolas sustentáveis e o desenvolvimento de novas tecnologias devido uma observação mais detalhada desses fatores.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Robson Andrei Sanches de; SILVA, Carolina Amaral Tavares; SILVA, Suedêmio de Lima. Desempenho energético de um conjunto trator-semeadora em função do escalonamento de marchas e rotações do motor**. Agrarian**, v.3, n.7. Dourados (MS), 2010, pag. 63-70, ISSN 1984-2538

ANGHINONI, M. **Mecanismos dosadores e velocidade de deslocamento do conjunto trator semeadora nos componentes agronômicos do milho**. Dissertação 44p. 2019. Matheus Anghinoni-2019

BATISTELLA FILHO, F.; VITTI MORO, F.; CARVALHO, N. M. Relationships between physical, morphological, and physiological characteristics of seeds developed at different positions of the ear of two maize (*Zea mays* L.) hybrids. **Seed Science and Technology**, Zurich, v. 30, p. 97-106, 2002.

BAYER. **The Impact of Corn Seed Size and Yield Potential.** Crop Science United States. 20/03/2022. Disponível em: https://www.cropscience.bayer.us/articles/bayer/understanding-the-impact-of-corn-seed-size-on-yield-potential. Acesso em: 11 maio. 2025.

BOTTEGA, E. L. et al. Qualidade da semeadura do milho em função do sistema dosador de sementes e velocidades de operação. ***Global Science and Technology***, V.7, n.1, ISSN 1984-3801, Jan/abr, pag.107-114, 2014. DOI: 10.14688/1984-3801/GST.V7N1P107-114.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, CONAB. **safra de grãos 2024/25 tem estimativa recorde de 330,3 milhões de toneladas**. Agência GOV. 10/04/2025. Disponível em: https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202504/producao-de-graos-e-estimada-em-330-3-milhoes-de-toneladas-na-safra-2024-25. Acesso em: 11 maio. 2025.

DUARTE, A. P. Milho safrinha se consagra e caracteriza um sistema peculiar de produção. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 33, n. 4, p. 78-82, 2015.

MIALHE, Luiz Geraldo. **Máquinas agrícolas para plantio**. Campinas: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Acesso em: 11 maio 2025, 2012.

ISBN 978-65-990392-6-3

PEREIRA, Júlio César Santos; MARQUES FILHO, Aldir Carpes; GRUDTNER, Guinther Hugo; SILVA, Paulo Roberto Arbex. O FORMATO DAS SEMENTES PODE INFLUENCIAR A PLANTABILIDADE DO MILHO EM DOSADORES PNEUMÁTICOS? **ENERGIA NA AGRICULTURA**, *[S. l.]*, v. 36, n. 1, p. 17–27, 2021. DOI: 10.17224/EnergAgric.2021v36n1p17-27. Disponível em: https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/3822. Acesso em: 11 maio. 2025.

REIS, Ângelo Viera dos. Erros na semeadura. **Cultivar Máquinas**. 10/11/2015. Disponível em: https://revistacultivar.com.br/artigos/erros-na-semeadura . Acesso em: 11 maio. 2025

SCHMIDT, F. Qualidade da classificação física e plantabilidade no campo de lotes de sementes de milho variedade. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 5, n. 7, p. 8591-8602, 2019.

Shi, L.; Zhao, W.; Rao, G.; Guo, J.; Wang, Z. Modeling of Typically Shaped Corn Seeds and Calibration of the Coefficient of Rolling Friction. **Agronomy**, 2023, *13*, 1573. https://doi.org/10.3390/agronomy13061573. Acesso em: 11 maio. 2025

TROGELLO, E.; MODOLO, A. J.; PORTES, A. F.; BRUSAMARELLO, A. P. Tamanhos e formatos de sementes não influenciam a germinação, desenvolvimento e produtividade da cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 19, n. 1-2, p. 41-48, 2013.

WANG, Chao. The influence of seed variety and high seeding speed on pneumatic precision seed metering. **Science ON**, v.43, n.3, 2023. Disponível em: https://accesson.kisti.re.kr/main/search/articleDetail.do?artiId=ATN0044209295#. Acesso em: 06 maio. 2025.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 70

ESTRUTURA DE FUNÇÕES E IDENTIFICAÇÃO DE REQUISITOS PARA O PROJETO DE UM SISTEMA DE CONDUÇÃO DE SEMENTES EM PRECISÃO PARA ALTAS VELOCIDADES

Function Structure and Requirements Identification for the Design of a Precision Seed Doser and Conduction Mechanism for High Speeds

João Batista da Silva Santos[1]; Vinicius Kaster Marini[2]

[1] UFSM, Mestrando em Agricultura de Precisão, Av. Roraima, 1000 - Camobi, Santa Maria - RS, 97105-000, joao-santos.2@acad.ufsm.com.br;
[2] Ph.D. Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia - Av. Roraima, 1000, Prédio 10, Sala 402G 97105-900, Santa Maria – RS, Brasil. vinicius.marini@ufsm.br;

RESUMO

Dosadores de sementes para semeadura precisa tem surgido cada vez mais no mercado afim de aumentar a precisão na distribuição de sementes das grandes culturas para aumentar a produtividade. O objetivo deste trabalho foi desenvolver a estrutura de funções para um sistema que se encontra na fase de desenvolvimento, também na identificação, necessidades e requisitos dos clientes, requisitos e especificações de projetos com valores-metas definidos para o projeto de um dosador e mecanismo de condução de sementes de precisão para altas velocidades para plantio direto. Foi desenvolvido a estrutura de funções analisando toda documentação referente ao desenvolvimento do produto, como projetos 3D e 2D. A identificação e necessidades dos clientes, foi realizada através de levantamento direto com todos os envolvidos no processo de desenvolvimento da tecnologia, produtores rurais e operadores de semeadoras. Foi possível determinar uma estrutura funcional para apresentar as subfunções parciais do sistema: F1 (Dosar sementes), F2 (Transferir sementes), F3 (Conduzir, monitorar e sincronizar sistemas) estabelecendo ações no controle de entrega de sementes ao sulco de semeadura com qualidade e precisão da tecnologia em desenvolvimento. Foi identificado 71 necessidades dos clientes, das quais foram transformadas em 34 requisitos dos clientes Na fase de requisitos de projetos e especificações de projetos, foi considerado somente a fase de Uso e Manutenção, resultando em 18 requisitos de projetos e 18 especificações de projetos com valores meta atribuídos.

Palavras-chave: Dosador de Precisão. Ciclo de vida. Projeto informacional.

ABSTRACT

Seed metering devices for precision seeding have been increasingly appearing on the market to increase seed distribution accuracy for heavy crops and boost productivity. The objective of this work was to develop a functional structure for a system currently in the development phase, also identifying customer needs and requirements, as well as project requirements and specifications with defined target values for the design of a precision seed metering device and seed conveying mechanism for high-speed no-till planting. The functional structure was developed by analyzing all documentation related to the product development, such as 3D and 2D designs. Customer needs were identified through direct surveys of all those involved in the technology development process, including rural producers and seed drill operators. A functional structure was established to present the system's partial subfunctions: F1 (Seed metering), F2 (Seed transfer), and F3 (Guide, monitor, and synchronize systems), establishing actions to control seed delivery to the seeding furrow with the quality and precision of the technology under development. 71 customer needs were identified, of which 34 customer requirements were transformed. In the project requirements and project specifications phase, only the Use and Maintenance phase was considered, resulting in 18 project requirements and 18 project specifications with assigned target values.

Keywords: Precision Planters. Product Life Cycle. Informational Project.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico na mecanização agrícola tem proporcionado o desenvolvimento de dosadores de precisão evoluída, projetados para operar em altas velocidades de semeadura sem comprometer a qualidade da distribuição das sementes. Estes dispositivos utilizam tecnologias avançadas, como sistemas de controle eletrônico e sensores, para garantir que cada semente seja colocada no solo com precisão, minimizando falhas e sobreposições que podem ocorrer com o uso de métodos e tecnologias tradicionais de semeadura. Por exemplo, We (2015) desenvolveram um estudo experimental de medição a vácuo para semeadura de precisão em alta velocidade utilizou o método de superfície de resposta para otimizar os parâmetros de operação, resultando em índices de qualificação superiores a 96% a uma velocidade operacional de 9.0 km h^{-1}. Liu et al. (2015) desenvolveram uma série de discos de semeadora para cobrir as diferentes variedades de sementes de soja, otimizando a velocidade de operação e garantindo a semeadura precisa em velocidades de 6 a 9 km h^{-1}.

Pereyra et al. (2022), avaliando o impacto da uniformidade espacial entre plantas na produtividade da soja utilizando dois modelos de semeadoras com tecnologia de semeadura diferentes (Max Emerge e Exact Emerge) verificaram que o sistema Exact Emerge melhorou a uniformidade entre plantas aumentando o número de plantas perfeitamente espaçadas (24%), diminuiu o número de plantas duplas (1,3%) e plantas mal colocadas em 66% (4,3%) em comparação com a semeadora Max emerge (12, 7,8 e 13%, respectivamente).

Olomitutu et al. (2024), avaliaram a resposta da soja a semeadura em alta velocidade no estado de Mississippi - E.U.A, utilizando uma semeadora mecânica (John Deere 1700 acionada por roda em contato com o solo equipada com medidor eSet e downforce de airbag) e uma semeadora de precisão (barra de ferramentas John Deere com unidades de linha MaxEmerge 2 adaptadas com Ag Leader SureSpeed e downforce hidráulico SureForce) em diferentes velocidades de semeadura, concluíram que, o aumento da velocidade geralmente aumentou o espaçamento entre plantas, a variabilidade do espaçamento na linha e reduziu a população de plantas. Porém, o aumento da velocidade de semeadura não afetou a produtividade da soja e a semeadora de precisão na velocidade de 17,7 km h^{-1} apresentou o mesmo nível de desempenho que a semeadora mecânica na velocidade de 9,7 km h^{-1} em 2023.

O desempenho da semeadora também tem importante influência na formação do estande de plantas. Isso porque seus mecanismos dosadores têm papel essencial para que as sementes sejam distribuídas corretamente nos espaços, sem plantas duplas ou falhas de espaçamento (CORREIA *et al.,* 2014). Para Bertelli et al. (2016), na cultura da soja a distribuição de sementes é um fator tão importante que os implementos responsáveis por esta função são denominados de semeadoras de precisão. De acordo esses autores quando se tem o erro de plantabilidade é causado um uso ineficiente dos recursos como água, luz solar, nutrientes, pois as plantas competem entre si desenvolvendo-se irregularmente, bem como o surgimento de plantas daninhas.

Taviera et al. (2022), analisando a distribuição longitudinal da soja em bancada simuladora com quatro tubos condutores de distintas marcas e ângulos em três velocidades de semeadura 5, 7 e 9 km h^{-1}, demonstraram que o aumento da velocidade de semeadura ocasionou redução no número de espaçamentos aceitáveis e aumento nos valores de falhas e espaçamentos múltiplos e no coeficiente de variação. Bamberg (2024), avaliando distribuição de sementes de soja em diferentes velocidades de semeadura e ângulos do condutor de sementes em campo, demonstra que o ângulo do tubo condutor por gravidade tem influência na produtividade. A geometria do tubo foi vista apresentando melhor eficácia em relação à produtividade nas velocidades de deslocamento mais baixas.

Com todos esses fatores correlacionados a plantabilidade da soja, principalmente

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

relacionando a velocidade de semeadura e condução de sementes, dosadores de alta precisão que entregam uma melhor deposição de sementes no solo independente da velocidade se torna cada vez mais necessário, pois as perdas de produtividade com sistemas convencionais são grandes, muitas das vezes sendo necessário a ressemeadura

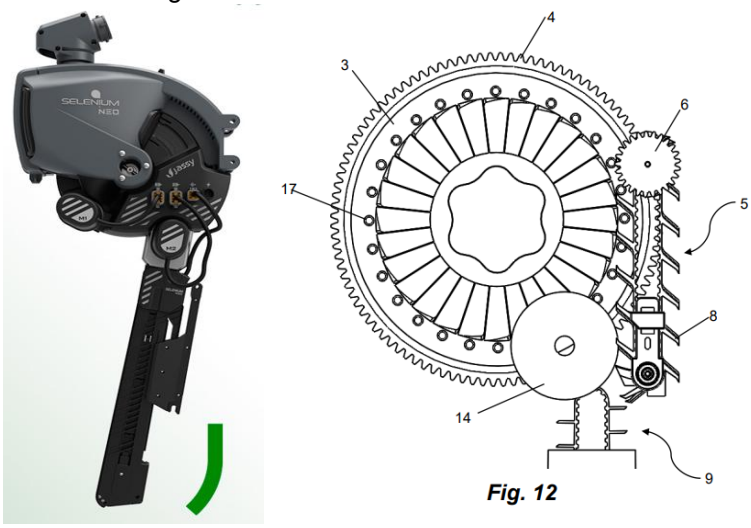
Este trabalho insere-se na fase de projeto informacional, cujo objetivo consiste na criação da estrutura de funções para o sistema que se encontra na fase de desenvolvimento, também na identificação dos clientes do ciclo de vida do produto, das necessidades e requisitos dos clientes, dos requisitos e especificações de projetos com valores-metas definidos

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho se constitui na forma de estudo aplicado de pesquisa descritiva acerca dos requisitos necessários para a implementação de sistema condutor de sementes, considerando o caso particular da tecnologia de dosador batizada com o nome de Selenium Neo pela fabricante J. Assy (Figura 1).

A tecnologia conta com exclusivo sistema de passagem de sementes entre o disco dosador e o elemento condutor de sementes, para que a transferência das sementes até o solo seja conduzida de forma ativa.

Figura 1. Dosador Selenium Neo



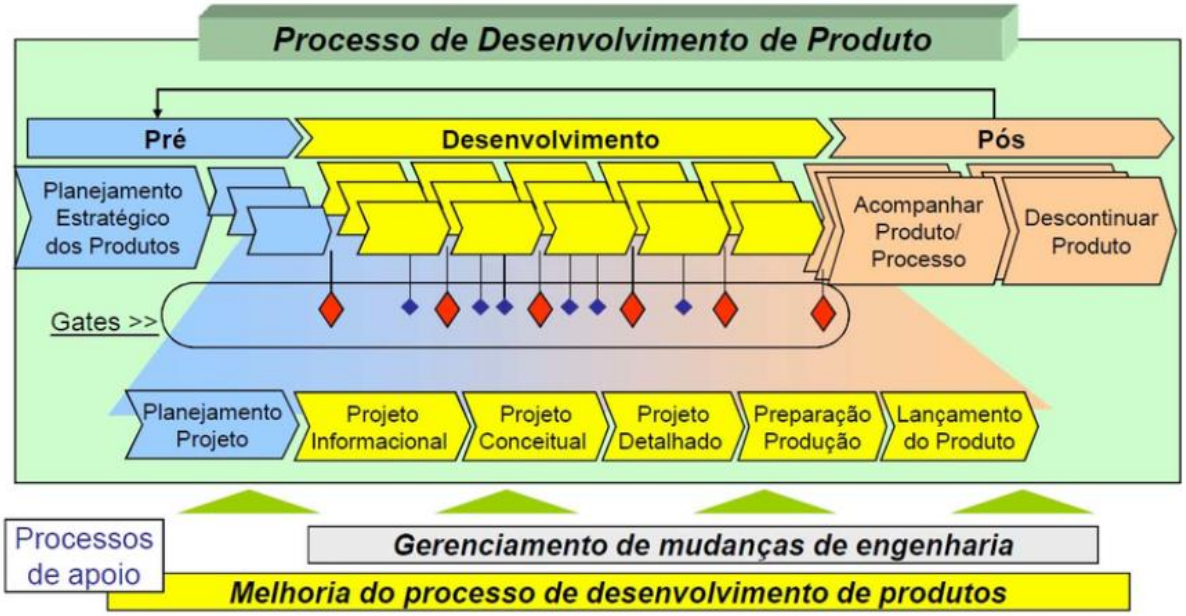
Fonte: (J.ASSY, 2025)

Foi desenvolvido a estrutura de função para o sistema analisando detalhadamente toda documentação referente ao desenvolvimento do produto, como projetos 3D e 2D, de acordo com o modelo da estrutura de funções elementares desenvolvidas por Alberti & Marine, 2023 para tecnologias semelhantes de condução ativa de sementes.

Foi utilizado o modelo de desenvolvimento de produto de Rozenfeld et al. (2006) conforme a figura 2, onde o projeto informacional tem como objetivo criar um conjunto de informações, o qual é chamado de especificações-meta do produto. Essa etapa tem como finalidade identificar as características que os clientes querem no produto, ou seja, características que devem ser consideradas no desenvolvimento do produto.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2. Modelo de Processo de desenvolvimento de produto de Rozenfeld.



Fonte: (ROZENFELD, 2006)

Para levantamento das informações de identificação e necessidades dos clientes, utilizou-se foi realizada através de levantamento direto com todos os envolvidos no processo de desenvolvimento da tecnologia, produtores rurais e operadores de semeadoras, posteriormente sendo transformados em requisitos dos clientes, requisitos de projetos e especificações de projetos com valores-metas atribuídos, utilizando como referência as especificações de projeto propostas para o desenvolvimento de um dosador de precisão para sementes miúdas por REIS e FORCELLINI, (2006).

Para melhor entendimento da equipe de engenharia de Pesquisa e Desenvolvimento, sobre as necessidades dos clientes obtidas, foi levantado os requisitos dos clientes que representam uma expressão verbal das necessidades dos clientes levantadas durante a fase do ciclo de vida do produto traduzindo-o de forma objetiva e compreensível ao departamento.

Para levantamento dos requisitos de projetos foi considerado somente as fases de Uso e de Manutenção da tecnologia para realização do levantamento de informações, pois são as fases em que se tem maior contato direto com os usuários finais do produto.

De acordo com Marine (2006), os requisitos de projeto ainda devem agregar mais informações de forma que possam ser listados como especificações de projeto para os projetistas do produto estabelecendo uma forma de medir esses parâmetros e também para aferição do atendimento do produto em desenvolvimento aos valores estabelecidos. Assim foi levantado as especificações de projetos com valores-metas definidos para o projeto também nas fases de Uso e Manutenção.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

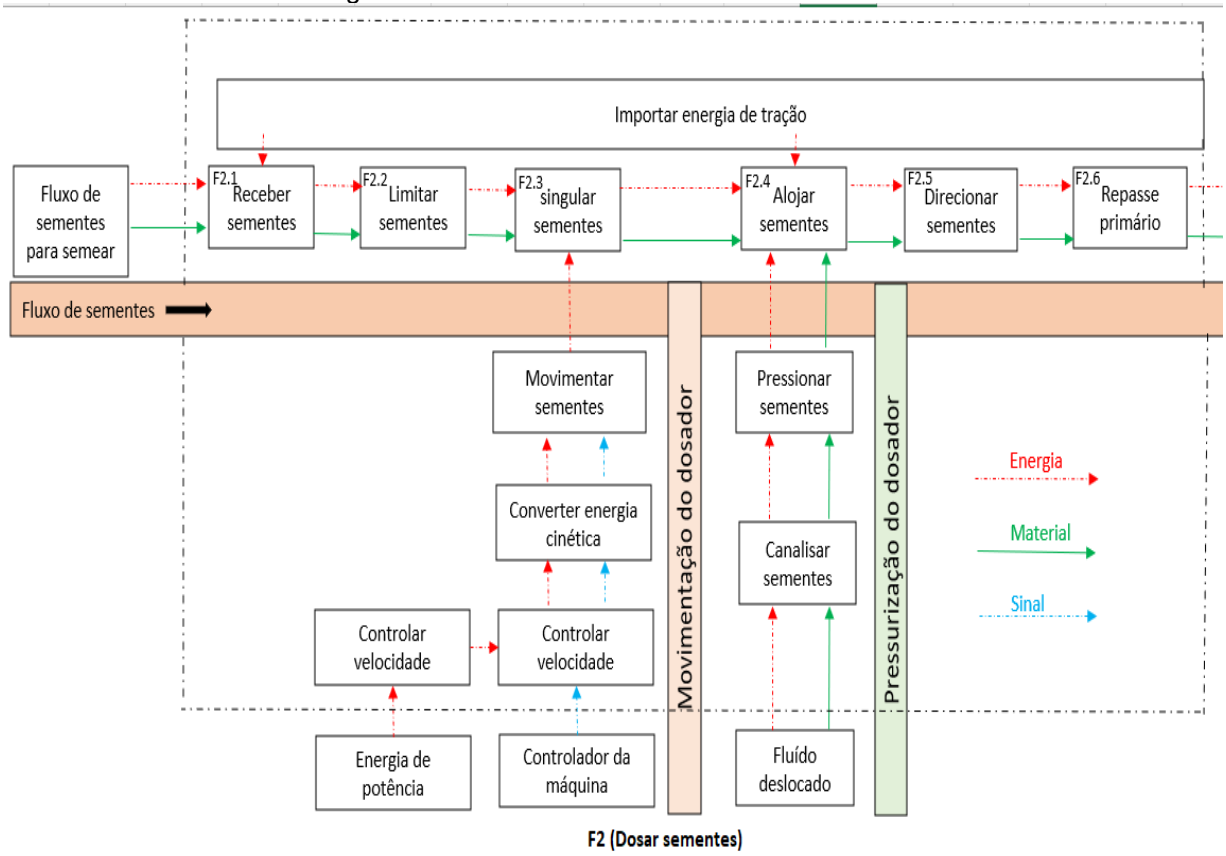
As novas tecnologias para condução de sementes de precisão até o solo eliminando o efeito da gravidade se mostram uma grande inovação e o futuro da semeadura de precisão, especificamente quando se alinha velocidade de semeadura com precisão na singulação e distribuição de sementes ao longo do sulco de semeadura (Alberti et al.,2023).

A principal função da tecnologia analisada (Selenium NEO), consiste na singulação das sementes dentro do dosador e transporte individual até o solo. Sendo assim, foi possível

ISBN 978-65-990392-6-3

estabelecer a estrutura de funções elementares para este novo conceito de mecanismo dosador que possui um conceito diferente na transferência da semente do disco dosador para a esteira transportadora, organizada desde três funções parciais do sistema: F2 (Dosar sementes, Figura 2), F3 (Transferir sementes, Figura 3) e F4 (Conduzir, monitorar e sincronizar sementes, Figura 4.).

Figura 2. Estrutura funcional F2 dosar sementes.



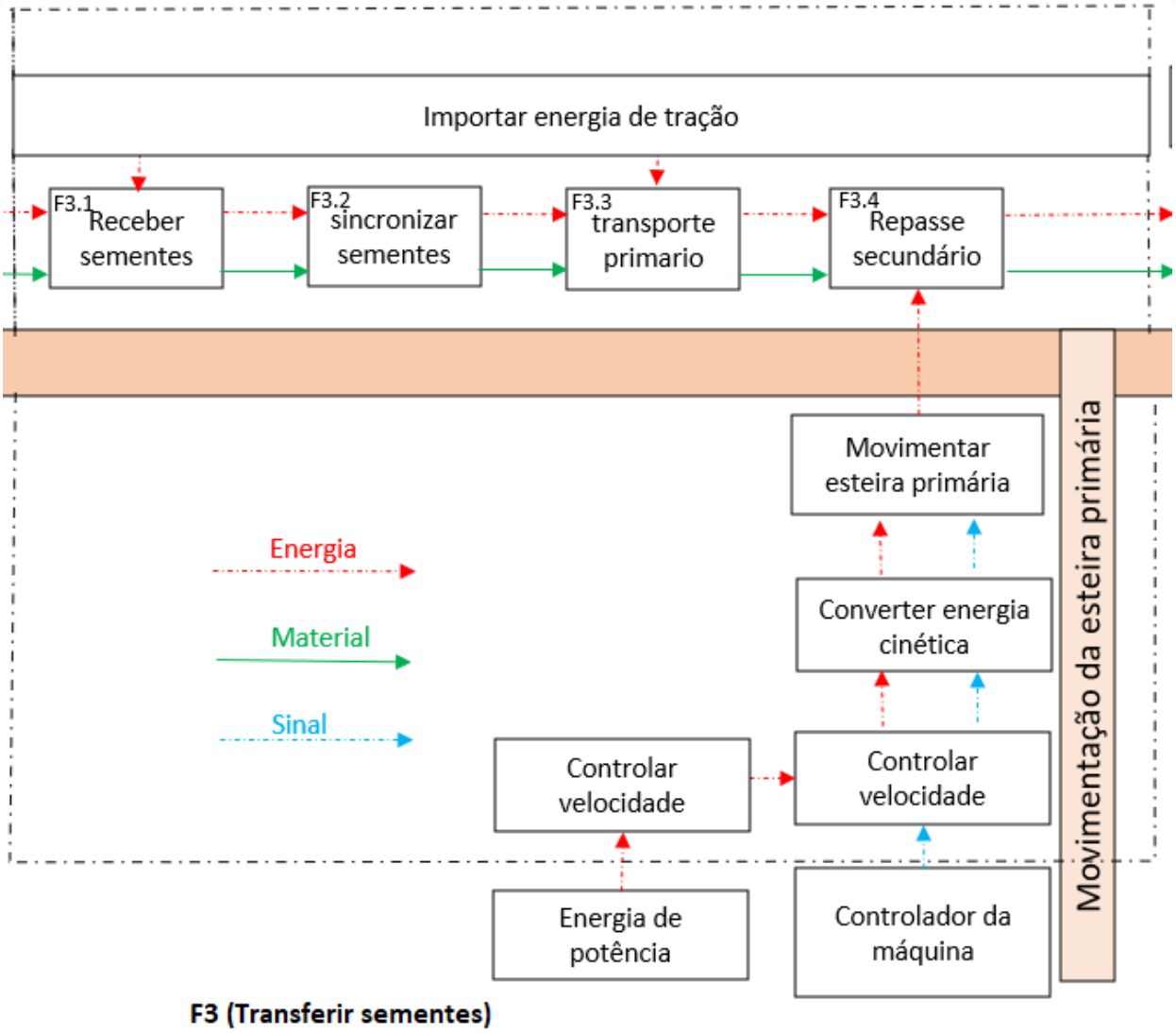
Fonte: Adaptado de Alberti e Marine (2025).

Assim, as três funções parciais são decompostas, onde o primeiro estágio F2 (Dosar sementes) tendo a decomposição: F2.1 (Receber sementes) representa o recebimento das sementes dentro do dosador através dos mangotes; F2.2 (Limitar sementes) limita a quantidade de sementes a ser alocada dentro do reservatório do dosador; F2.3 (Singular sementes) processo de selecionar e individualizar cada semente; F2.4 (Alojar sementes) aloja as sementes após serem individualizadas nos alvéolos do disco dosador através da pressão negativa do ar; F2.5 (Direcionar sementes) guia as sementes sobre a velocidade tangencial do disco dosador para realizar o primeiro repasse; F2.6 (Repasse primário) ato onde se ocorre o primeiro repasse da semente do disco dosador para a esteira primaria contida do disco dosador.

O segundo estágio F3 (Transferir sementes) é decomposto da seguinte forma, conforme representação da Figura 3: F3.1 (Receber sementes) representa o recebimento das sementes da esteira primária; F3.2 (Sincronizar sementes) individualiza cada semente em cada célula da esteira primária expulsando o excesso; F3.3 (Transporte primário) conduz a semente na esteira primária para realização da transferência para a esteira condutora; F3.4 (Repasse secundário) realiza o segundo repasse da semente para o mecanismo de transferência para a esteira condutora.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 3. Estrutura funcional F3 transferir sementes.

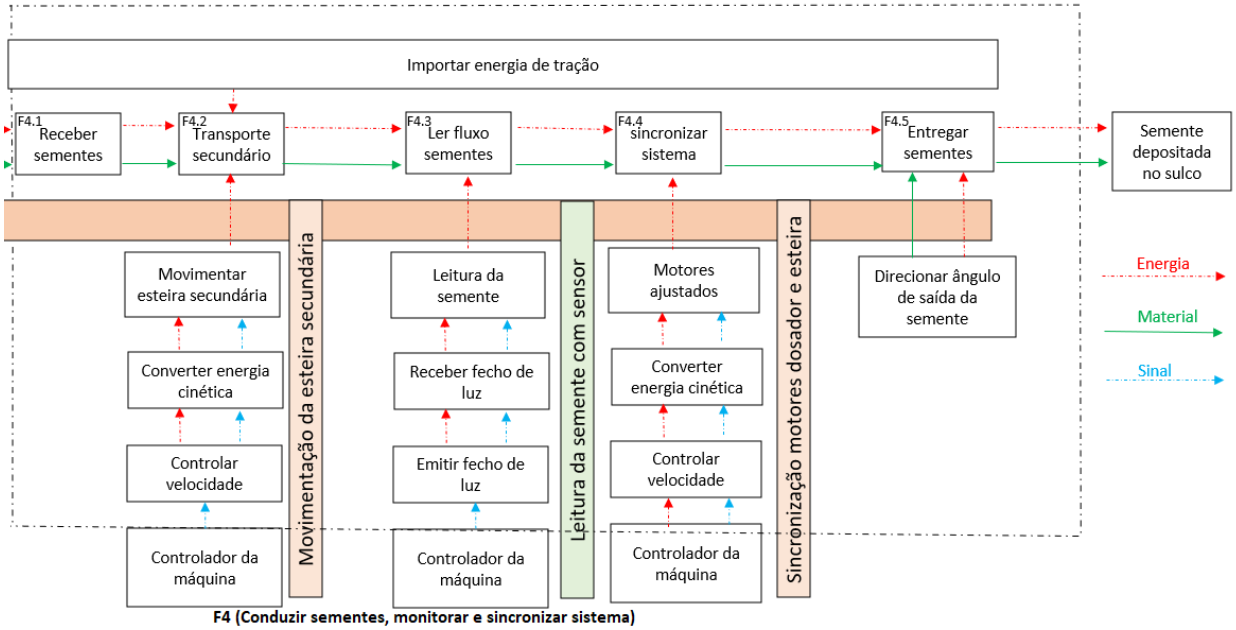


Fonte: Adaptado de Alberti e Marine (2025).

O terceiro e último estágio F4 (Conduzir, monitorar e sincronizar sementes) é decomposto da seguinte maneira como mostrado na Figura 4: F4.1 (Receber sementes) ato onde a esteira condutora principal recebe as sementes nas suas células; F4.2 (Transporte secundário) realização do transporte da semente através da esteira condutora em direção ao sulco; F4.3 (Ler fluxo de sementes) monitoramento da quantidade de sementes e qualidade do alojamento das sementes em cada célula da esteira condutora; F4.4 (Sincronizar sistema) através da leitura do fluxo de sistema realiza o processo de sincronia de rotação dos motores do dosador e da esteira para melhorar a qualidade de condução; F4.5 (Entregar sementes) deposita a semente no sulco de semeadura de forma uniforme e com mínima variações de ângulos de saída das sementes.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 4. Estrutura funcional F4 conduzir sementes, monitorar e sincronizar sistema.



Fonte: Adaptado de Alberti e Marine (2025).

Ao considerar as especificações de projeto propostas para o desenvolvimento de um dosador de precisão para sementes miúdas por REIS e FORCELLINI, (2006), foram levantados os clientes potenciais durante todas as fases do ciclo de vida do dosador e para o mecanismo de condução de sementes de precisão para altas velocidades para plantio direto, porém acrescentando novas fases durante o ciclo de vida do produto. Na Tabela 1 é possível ver as definições de todas as fases e envolvidos, onde foram definidas 13 fases do ciclo de vida para o mecanismo dosador.

Tabela 1 - Clientes do ciclo de vida do sistema dosador e condutor de sementes

FASES DO CICLO DE VIDA	CLIENTES
Conceito	**Fabricante de Tecnologia Agrícola:** Departamento de marketing de produto, P&D, Agricultores, e Propriedade Intelectual.
Projeto	**Fabricante de Tecnologia Agrícola:** Equipe de projetos, gerência e stakeholders
Validação	**Fabricante de Tecnologia Agrícola:** Engenharia Aplicada
Lançamento	**Fabricante de Tecnologia Agrícola:** Engenharia de NPI, Processos, Departamernto de Qualidade e Marketing
Produção	**Fabricante de Tecnologia Agrícola:** Manufatura e PCP – Planejamento e controle de produção

ISBN 978-65-990392-6-3

Montagem	**Fabricante de Tecnologia Agrícola:** Departamento montagem
Inspeções de qualidade	**Fabricante de Tecnologia Agrícola:** Departamento de Qualidade e Montadores de fim de linha de montagem
Embalagem	**Fabricante de Tecnologia Agrícola:** Departamento de montagem e expedição
Expedição e Distribuição	**Fabricante de Tecnologia Agrícola:** Departamento de expedição e logística **Transportadoras de Mercadorias**
Comercialização	**Concessionárias agrícolas, Revendas Locais, Cooperativas, Revendedores e Agricultores**
Uso	**Operadores, Agricultores, Técnicos Agrícolas, Agrônomos, Engenheiros Agrícolas**
Manutenção	**Operadores, Técnicos de Manutenção, Fabricante da Tecnologia e Revendas Autorizadas**
Retirada	**Fabricante de Tecnologia Agrícola**

Fonte: Autores (2025).

O levantamento das necessidades dos clientes em cada fase do ciclo, são apresentadas na Tabela 2, foi possível estabelecer 65 necessidades totais dos diferentes grupos de em cada fase do ciclo de vida.

Tabela 2 - Necessidades dos clientes ao longo do ciclo de vida do produto.

FASES DO CICLO DE VIDA	NECESSIDADES DOS CLIENTES
Conceito	1. Individualizar adequadamente a entrega de sementes 2. Entregar as sementes ao solo com espaçamento longitudinal preciso 3. Controlar a população de sementes individualmente para cada linha 4. Identificar a saída de cada semente dosada e entregue 5. Precisão na dosagem e distribuição até 16 km h^{-1} 6. Regulagem fácil
Projeto	7. Baixa influência da velocidade sobre o desempenho 8. A performance do dosador e da esteira deve ser independente da inclinação do terreno 9. A equipe de projetistas e desenvolvedores do produto devem ter maior

ISBN 978-65-990392-6-3

	vivência e conhecimento do campo 10. Os projetistas devem pensar mais nas pessoas e usuários de campo que vão operar a máquina 11. Deve possuir formato que dispensa uso de ferramentas 12. O projeto do dispositivo proporciona relação custo-benefício atrativa ao cliente 13. Prevenir a entrada de elementos estranhos como umidade e poeira. 14. Proporcionar liberdade de movimento com menor dependência de lubrificação. 15. Simples de entender e manter 16. Insensível a variações de uso carga dentro da faixa operação prevista 17. Fornecer provisão para individualizar/singular sementes finas e pequenas 18. Componentes de reposição devem ser fácies de encontrar
Validação	19. O conjunto completo de tecnologia deve ser validado 20. Envolver as pessoas de interesse na validação de campo 21. Ser aprovado de acordo com a satisfação do agricultor
Lançamento	21. Que seja introduzido na fábrica sem atrasos 22. Seja atendido as expectativas dos stakeholders dentro dos prazos 23. Que seja realizado uma folha de processo bem estabelecida
Produção	24. Ter o mínimo de reprovação e descarte 25. Precisão controlada na fabricação 26. Ausência de aresta e quinas 27. Ter baixo custo de produção, com baixa utilização de matéria prima, hora máquina e hora homem 28. Ter alta qualidade na fabricação das peças 29. Não possuir divergência na identidade visual das peças 30. Ocupar pouco volume físico de estoque
Montagem	31. Fácil montagem na linha 32. Ter baixo custo de montagem 33. Utilizar ferramentas que já possui na linha 34. Que tenha alto volume em menor tempo

ISBN 978-65-990392-6-3

Inspeções de qualidade	35. Realizar teste de conformidade de todos os elementos 36. Obter no final dos testes um banco de dados/relatórios de aprovação e consultas de cada produto
Embalagem	37. Ter robustez para transporte 38. Adequação para exportação 39. Visual para expor nas revendas
Expedição e Distribuição	40. Seja possível ser expedido e carregado em paletes com grandes quantidades
Comercialização	41. Ter preço competitivo 42. Possuir vantagens que gera valor para os clientes 43. Ter time técnico capacitado para atendimento 44. Ser realizado pós-venda e entrega técnica
Uso	45. Simples e intuitivo de usar 46. Efetuar o plantio preciso de uma variedade de grandes culturas 47. Efeturar plantio preciso com baixo coeficiente de variação 48. Permite controle e ajuste desde a cabine do trator. 49. Permanecer funcional sob as cargas e ambientes adversos do trabalho em campo. 50. O dispositivo individualiza e entrega a semente de maneira controlada e precisa. 51. O dispositivo possui peças móveis duráveis e resistentes. 52. O dispositivo é capaz de efetuar a variaçao localizada da população de sementes em campo. 53. O dispositivo é capaz de chavear (ligar/desligar) o fluxo e a entrega de sementes em eventos. 54. O sistema é capaz de efetuar a compensação de espaçamentos na trajetória curva da máquina. 55. O dispositivo é capaz de permanecer em funcionamento em regime operacional. 56. O dispositivo preserva a integridade das sementes em plantio.
Manutenção	57. Ter baixa manutenção 58. Peças de reposição fácil de encontrar 59. Peças de manutenção baratas 60. Ser de fácil acesso

ISBN 978-65-990392-6-3

	61. Ter baixo desgastes 62. Menor uso de ferramentas possíveis
Retirada	63. Retornar para a indústria 64. Reciclar 65. Ter plano de troca

Fonte: Adaptado de (REIS e FORCELLINI, 2006).

Das necessidades dos clientes, foi possível estabelecer 34 requisitos dos clientes traduzindo-o de forma objetiva e compreensível ao departamento de engenharia de desenvolvimento.

Tabela 3 - Requisitos dos clientes ao longo do ciclo de vida do produto.

FASES DO CICLO DE VIDA	REQUISITOS DOS CLIENTES
Conceito	1. Plantar em alta velocidade com precisão
Projeto	2. Otimização de componentes 3. Componentes Nacionalizados 4. Baixo custo de desenvolvimento 5. Inovador 6. Ser simples
Validação	7. Que todos os componentes do projeto sejam validados no campo com o usuário final
Lançamento	8. Ter todo ferramental pronto na fábrica 9. Ter todos os processos definidos e estruturados na fábrica
Produção	10. Ter precisão e padronização de qualidade 11. Matéria prima de qualidade 12. Baixo índice de rejeição de peças 13. Utilizar máquinas já disponíveis para fabricação
Montagem	14. Ter o mínimo de necessidade no de uso ferramentas 15. Peças de encaixe rápido 16. Possibilidade de montagem automática de precisão
Inspeções de qualidade	15. Ter aprovação de performance do produto 16. Verificar se todas as funcionalidades de uso estão corretas
Embalagem	17. Robusta para não danificar o produto

ISBN 978-65-990392-6-3

	18. Não quebrar a mercadoria
Expedição e Distribuição	19. Envio correto para os clientes 20. Não ter erros de envio 21. Pedidos organizados por seções
Comercialização	22. Baixo preço 23. Ter retorno do investimento (ROI) 24. Pós-venda acessível
Uso	25. Ter baixo índice de sementes falhas 26. Ter baixo índice de sementes duplas 27. Sem danificar as sementes 28. Ter alto índice de espaçamentos aceitáveis 29. Precisão da distribuição independente da velocidade 30. Ter alta capacidade operacional 31. Ser possível atualizar softwares 32. Ter integração com outros tecnologias de plantio 33. Ser compatível com plataforma de geração de dados (FieldView) 34. Possuir o mínimo de chicotes elétricos 35. Demandar o mínimo de força de tração 36. Compatibilidade modelos de linha de plantio 37. Ter o mínimo de ECU´s - (electronic control unit) 38. Ser possível visualizar todos os parâmetros da distribuição de sementes em forma de gráfico no monitor
Manutenção	31. Peças sem necessidades de manutenção 32. Sem uso de ferramentas 33. Ter pouco desgaste no ambiente de campo
Retirada	34. Ter um critério estabelecido para a fábrica e plano de troca futura

Fonte: Adaptado de (REIS e FORCELLINI, 2006).

Considerado somente as fases de Uso e de Manutenção da tecnologia para realização do levantamento de informações, sendo as fases em que se tem maior contato direto com os usuários finais do produto, foi identificado 19 requisitos de projeto, conforme apresentado na Tabela 4.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 4 - Requisitos de projetos nas fases de uso e manutenção.

FASES DO CICLO DE VIDA	REQUISITOS DE PROJETOS
Uso	01. Gerador de energia independente 02. Velocidade no acionamento dos motores e esteiras 03. Altura mínima da quantidade de sementes dentro do dosador 04. Capacidade de dosagem por área 05. Capacidade de singular em alta velocidade 06. Capacidade de conduzir e lançar semente em alta velocidade 07. Comunicação wireless 08. Tempo de resposta do controle de dosagem 09. Número de opções de discos e esteira de acordo com a cultura 10. Controle dos motores e esteiras em áreas de curvas e taxa variável 11. Utilizar o monitor do piloto automático do trator 12. Coeficiente de variação de distribuição vertical 13. Coeficiente de variação de distribuição longitudinal 14. Espaçamentos aceitáveis acima de 95% em toda a faixa de população de planta.
Manutenção	15. Tempo de manutenção e reparo 16. Tempo da vida útil 17. Confiança na tecnologia 18. Limpeza pós safra 19. Velocidade de atualizações

Fonte: Autores (2025).

Para as especificações de projeto, foi possível obter 17 especificações com valores metas atribuídas bem como a forma de avaliação e medição de parâmetros.

Tabela 5 - Especificações de projeto nas fases de uso e manutenção.

FASES DO CICLO DE VIDA	ESPECIFICAÇÕES DE PROJETOS	VALOR-META	FORMA DE AVALIAÇÃO
	01. Energia independente	Bomba hidráulica TDP, alternador 250A, e duas baterias 12V	Medir consumo de corrente e tensão com 72 linhas de plantio e 32 sementes de soja por metro
	02. Agilidade no acionamento dos	Motores VDC 24V, de tecnologia Brushless	Medir em campo a distância e tempo para

ISBN 978-65-990392-6-3

Uso	mecanismos dosadores e esteiras	adaptado na periferia do disco dosador controlados por GNSS	acionamentos dos mecanismos.
	03. Altura do nível de sementes dentro do dosador	Design do corpo do dosador e do disco devem limitar a entrada de semente dentro do dosador para melhor singulação das sementes	Realizar um benchmarket de outros mecanismos e comparar o nível de sementes dentro e avaliar a agitação e singulação do disco dosador
	04. Capacidade de dosagem em sementes por metro das culturas de soja, milho, algodão, feijão, feijão jalo, amendoim, milho doce, milho pipoca, girassol, sorgo, canola, trigo	Disco dosadores e esteira dimensionados para plantio até 16 km.h-¹ com quantidade de orifícios e aletas de acordo com a densidade de sementes por metro mínimo e máximo de cada cultura. Ter no máximo 1% de falha, 1% de dupla e 98% de aceitáveis no laboratório	Avaliar em laboratório as condições mínimas de velocidade e densidades mínimas e máximas para verificar se mantém a taxa de distribuição estabelecida para cada cultura e resultados esperados com relação a espaçamentos duplos, falhos e aceitáveis.
	05. Singular sementes com precisão até 16 km.h-¹	Design dos discos dosadores, os singuladores e agitadores devem ter resultados acima de 98% de singulação	Avaliar em laboratório utilizando câmera go pro para gravação da singulação e sensor de semente fotovoltaico para monitorar o índice de singulação de cada disco
	06. Conduzir sementes e lançar no sulco até 16 km.h-¹	Projeto da esteira com taliscas elevadoras espaçadas de forma que tenha sincronia na captura no disco dosador de acordo com a população e velocidade, no mínimo 98% de sincronia na transferência de condução dos orifícios do disco para a esteira	Avaliar em laboratório a sincronia de transferência do disco dosador medindo a porcentagem de acertos e erros.
	07. Menor interferência de chicotes elétricos	Utilizar módulos com tecnologia de Radiofrequência de comunicação com as linhas de plantio, IP67, operação em banda de frequência fixa 2.4Ghz, com modulação GFSK, tensão de operação de 12 a 30V	Avaliar os sinais de comunicação da ECU principal com drivers de linha utilizando osciloscópio até 72 linhas de dosadores e esteira.
	08. Resposta precisa no controle de taxa	Utilizar controle GNSS com antena externa e orientação de velocidade para controle dos motores de acionamento	Validar em campo nas principais velocidades e culturas para verificar se mantém a taxa de distribuição.

ISBN 978-65-990392-6-3

Uso		do dosador e da esteira em função das velocidades de plantio 5 km.h-¹, 7 km.h-¹, 9 km.h-¹, 11 km.h-¹ e 16 km.h-¹	
	09. Discos de plantio para cada cultura e esteira	Desenvolver kits únicos para as culturas de maior valor agregado como soja, milho, algodão, feijão, feijão jalo, amendoim, milho doce, milho pipoca, girassol, sorgo, canola e trigo sem regulagem já projetado e regulado de fábrica, sendo necessário apenas ajuste de vácuo no plantio. As esteiras também devem ser otimizadas para que seja possível utilizar para todas as culturas.	Validar em laboratório cada disco de acordo com as culturas selecionadas
	10. Realizar semeadura em compensação de curva	Software com função de inserir o posicionamento da antena GPS configurando o mínimo e o máximo de Graus/Segundo para ativação do controle de taxa de acordo com raio de giro ao longo das linhas da semeadora mantendo a quantidade de sementes/metro	Validar em campo principalmente nas velocidades de 11 e 16 km.h-¹ realizando semeadura em áreas de curvas e verificar se as densidades de semeadura se mantêm
	11. Uso mínimo de display na cabine do trator	Utilizar tecnologia ISOBUS como padrão de comunicação, regulamentado pela Norma ISO 11783 e estabelecido pela Agriculture Industry Electronics Foundation (AEF), que padroniza a comunicação entre tratores, implementos e computadores	Validar em laboratório nos principais monitores com aceitação isobus dos tratores John Deere, AGCO e CNH
	12. Padronização na emergência de plantas com baixo coeficiente de variação vertical	Projetar mecanismos de direcionamento de fluxo com material de PU na ponta da esteira para eliminar a gravidade e manter a semente no mesmo ângulo de saída com variação máxima de 5°	Validar em laboratório utilizando folhas milimetradas com ângulos gravando em câmera lenta com a câmera Go-Pro a saída de cada semente
	13. Padronização da distribuição de sementes longitudinal e baixo	Garantir na esteira transportadora de sementes valores de	Avaliar em laboratório o coeficiente de variação na esteira

ISBN 978-65-990392-6-3

	coeficiente de variação	coeficiente de variação máximo aceitáveis para as culturas como: soja 10%, milho 4%, algodão 12%, feijão 10%, feijão jalo 10%, amendoim 13%, milho doce 5%, milho pipoca 6%, girassol 5% e sorgo 8%.	transportadora através de sensores de sementes
Manutenção	14. Menor tempo de paradas para manutenção no plantio	Utilizar componentes com tratamentos UV, antioxidantes, IP67, rolamentos blindados sem manutenção, eletrônica com resinas para impedir entrada de umidade e impurezas.	Submeter a testes de engenharia aplicada nas condições de utilização com poeira, chuva, grafite, tratamentos de sementes
	15. Aumento da vida útil	Selecionar componentes mecânicos e elétricos de fornecedores que possuem ISO 9001 identificando a matéria prima estabelecendo um mínimo de 6.000 horas de uso.	Avaliar na engenharia aplicada com simulações de campo e condições de estresse para validar se terá descante precoce dos componentes
	16. Limpeza dos mecanismos	Projeto com travas rápidas de engate, desde o dosador, o encaixe dos discos e o acoplamento da esteira sem uso de ferramentas	Realizar testes de instalações e limpeza em diversos modelos de unidades de linhas de plantio par validar se não terá alguma interferência no processo de limpeza.
	17. Up Grades	Desenvolvimento de software atualizador para notebook com conectividade na ECU para atualização de novos firmwares com novas funções de usuários	Validar atualizações em diversos monitores com versões diferentes de software para não ter bug

Fonte: Autores (2025).

4 CONCLUSÃO

Através da tecnologia foi possível analisar e determinar uma estrutura funcional para apresentar as subfunções parciais do sistema: F1 (Dosar sementes), F2 (Transferir sementes), F3 (Conduzir, monitorar e sincronizar sistemas) estabelecendo ações no controle de entrega de sementes ao sulco de semeadura com qualidade e precisão da tecnologia em desenvolvimento

A análise das 65 necessidades sintetizadas por meio da metodologia permitiu identificar 17 especificações finais de projeto com valores metas para atingimento para o projeto de um sistema de condução de sementes de precisão para altas velocidades.

Através deste presente trabalho, foi possível estabelecer padrões para que o time de engenharia de projetos e marketing de produtos possam entregar uma solução de valor que

PODER EXECUTIVO DE NÃO-ME-TOQUE · FARSUL · Sindicato Rural de Não-Me-Toque/RS · cotrijal · UFSM

ISBN 978-65-990392-6-3

atenda as expectativas de todos os clientes do ciclo de vida do produto, desde o conceito até a retirada do mercado oferecendo uma tecnologia disruptiva para o agronegócio mundial.

REFERÊNCIAS

ALBERTI, Bruno G**. Estudo das funcionalidades de condução e deposição de sementes de soja em semeadoras de precisão**, Santa Maria - RS, 2024, disponível em: http://repositorio.ufsm.br/handle/1/32507 acesso 02/06/2025

BAMBERG, Darlei München. **Condutores de sementes: distribuição de sementes de soja em diferentes velocidades de plantio e ângulos do condutor de sementes**. 2024. Dissertação – UFSM, Santa Maria, 2024.

BERTELLI, G. A.; et. al. Desempenho da plantabilidade de semeadoras pneumática na implantação da cultura da soja no cerrado piauiense – Brasil. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, Guarapuava-PR, v.9, n.1, p.91-103, 2016.

CORREIA, T.P.S.; et al. Deposição e danos mecânicos em sementes de sorgo utilizando um mecanismo dosador de fluxo contínuo em ensaio de bancada. **Revista Energia na agricultura**, v. 29, n. 1, p. 22-26, 2014.

LIU, P.; et al. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated salt-induced osmotic stress in Sorghum bicolor L. **Environmental and Experimental Botany**, v. 111, p. 42–51, 2015. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2014.10.006.

MARINI, V. K. **Fatores de Influência e Funções Técnicas no Projeto de Máquinas Agrícolas: uma contribuição teórica.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

OLOMITUTU, O. et al. (2024). Soybean response to high-speed planting in Mississippi. **Agronomy Journal**, 116, 2817–2826. https://doi.org/10.1002/agj2.21665

PEREYRA, V.M., *et al.* Early-season plant-to-plant spatial uniformity can affect soybean yields. **Sci Rep**, 12, 17128 (2022). https://doi.org/10.1038/s41598-022-21385-z

REIS, A. V. dos; FORCELLINI, F.A. Identificação de requisitos de clientes para o projeto de um dosador de precisão para sementes miúdas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.309-302, 2006.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de desenvolvimento de produtos**: uma referência para a melhoria do processo. São Paulo: Saraiva, 2006.

TOURINO, M. C. C.; et al. Espaçamento, densidade e uniformidade de semeadura na produtividade e características agronômicas da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 8, p.1071-1077, ago. 2002.

XUE, P.; et al. Double-Setting Seed-Metering Device for Precision Planting of Soybean at High Speeds. **Transactions of the ASABE**, 2019. DOI: 10.13031/trans.13055

ISBN 978-65-990392-6-3

WE, S. Experimental Study of Soybean High-speed Precision Vacuum Seed Metering Based on Response Surface Method. **Soybean Science**, 2015. Disponível em: https://www.semanticscholar.org/paper/Experimental-Study-of-Soybean-High-speed-Precision-We/31685c63d9993eb2ea4f3e7dd53ac1faf62e4433. Acesso em: 3 ago. 2024.



ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 71

QUALIDADE DE APLICAÇÃO DE CALDA NA CULTURA DA SOJA COM USO DE PINGENTES

Spray Solution Application Quality in Soybean Crop Using Pendant

Gilvan Moisés Bertollo[1]; Marcelo Luis Seibert[1]; Nícolas Panciera Cabral[1]; Renan Mariotti[1]; Mateus Piovesan[1]; Luis Felipe Albarello[1]; Guilherme Natalli Farias[1]; Antônio Luis Santi[1]

[1] Universidade Federal de Santa Maria campus Frederico Westphalen, Linha 7 de setembro, s/n, BR 386, km 40, 98400-000, Frederico Westphalen – RS, Brasil, gilvan.bertollo@ufsm.br, Marcelo.seibert@acad.ufsm.br, nicolas.cabral@acad.ufsm.br, luis.albarello@acad.ufsm.br, mateus.piovesan@ufsm.br, santi_pratica@yahoo.com.br

RESUMO

A arquitetura das plantas dificulta a deposição da calda nos estratos médio e inferior do dossel, locais preferenciais de instalação de doenças. Nesse contexto, tecnologias de aplicação, como os pingentes, surgem como alternativa para aumentar a penetração e uniformidade da pulverização. O objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência do uso de pingentes na deposição de calda em diferentes volumes e modos de aplicação. O experimento foi conduzido com a cultura da soja cultivar Pioneer 95R40 IRPO, no RS, utilizando delineamento em blocos ao acaso em esquema fatorial 4 x 3, com quatro repetições. Foram testados quatro volumes de calda (60, 100, 140 e 180 L/ha) e três modos de aplicação: convencional, pingente e combinado. A deposição foi quantificada com corante marcador azul brilhante e espectrofotometria. O uso do pingente, isolado ou associado ao sistema convencional, aumentou a deposição de gotas, principalmente nos volumes de 100, 140 e 180 L/ha.

Palavras-chave: Tecnologia de aplicação. Pulverização. Aplicação localizada.

ABSTRACT

The architecture of plants hinders the deposition of spray solutions in the middle and lower canopy layers, which are the preferred sites for disease establishment. In this context, application technologies such as pendants emerge as an alternative to improve spray penetration and uniformity. The objective of this study was to evaluate the efficiency of using pendants in spray deposition across different volumes and application methods. The experiment was conducted on soybean cultivar Pioneer 95R40 IRPO in Rio Grande do Sul, Brazil, using a randomized complete block design in a 4 × 3 factorial scheme with four replications. Four spray volumes (60, 100, 140, and 180 L/ha) and three application methods—conventional, pendant, and combined—were tested. Deposition was quantified using the Brilliant Blue dye and spectrophotometry. The use of pendants, either alone or combined with the conventional system, increased droplet deposition, especially at volumes of 100, 140, and 180 L/ha.

Keywords: Application technology. Spraying. Targeted application.

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) é uma das culturas agrícolas de maior relevância econômica e social no cenário mundial e nacional, desempenhando papel estratégico tanto na alimentação humana, de forma direta e indireta, quanto na produção de ração animal e insumos industriais

ISBN 978-65-990392-6-3

(ALVES *et al.*, 2022). Sua origem remonta ao século XI a.C., na China, de onde se expandiu para outras regiões por meio de processos históricos de domesticação e adaptação. Ao longo dos séculos, melhoramentos genéticos e avanços tecnológicos contribuíram para que a soja alcançasse status de commodity global. No Brasil, país que atualmente se posiciona como um dos maiores produtores e exportadores mundiais, a cultura ocupa posição de destaque no agronegócio, sendo elemento-chave para a composição do Produto Interno Bruto (PIB) agrícola e para a balança comercial (SFAIR, 2025).

De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2025), a safra brasileira atual alcança aproximadamente 47,5 milhões de hectares, resultando em uma produção de cerca de 166 milhões de toneladas de grãos. Tal desempenho produtivo está associado não apenas ao potencial genético das cultivares, mas também à adoção de tecnologias de manejo, práticas sustentáveis e controle eficiente de pragas e doenças. Contudo, o alto rendimento da cultura está diretamente condicionado à sanidade das plantas durante todo o ciclo, sendo imprescindível o controle fitossanitário adequado.

Entre as doenças que acometem a soja, a ferrugem asiática, causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi*, figura como uma das mais severas e economicamente impactantes (MOURA, 2024). Presente em todos os países produtores de soja, a doença encontra na América das Sul condições climáticas ideais para o seu desenvolvimento, caracterizadas por temperaturas amenas, alta umidade relativa do ar e molhamento foliar prolongado (LIDÓRIO, 2021). No Brasil, as perdas de produtividade associadas à ferrugem asiática podem variar de 10% a 90%, dependendo da pressão da doença e da eficácia do manejo adotado (DA ROSA, 2023).

O ciclo de infecção da ferrugem asiática tem início, geralmente, no baixeiro das plantas, onde o microclima formado pela alta densidade foliar favorece a manutenção da umidade e protege o patógeno de condições adversas. Os sintomas iniciais são caracterizados por pequenas lesões de coloração castanho-clara a marrom, que evoluem para a formação de urédias na face abaxial das folhas. Tais estruturas liberam uredósporos, responsáveis pela disseminação rápida da doença (ARBO, 2024). A disseminação é predominantemente aérea, via correntes de vento, e a sobrevivência do patógeno entre safras é favorecida pela presença de plantas voluntárias ou hospedeiras alternativas.

A intensidade e severidade da ferrugem asiática dependem de múltiplos fatores, incluindo a interação patógeno-hospedeiro-ambiente (AMARAL; BATISTA, 2023). O manejo integrado da doença contempla estratégias como o uso de cultivares precoces ou com resistência parcial, o escalonamento da semeadura, a adoção de períodos de vazio sanitário e, principalmente, a aplicação de fungicidas (TORMEN, 2022). A implementação de políticas públicas voltadas à detecção precoce da doença e à regulamentação do calendário de plantio contribuiu para reduzir significativamente sua severidade (HOFFMANN; BOLLER; FORCELINI, 2022).

Entretanto, o controle químico apresenta desafios logísticos e técnicos relacionados à deposição dos fungicidas no interior do dossel da cultura. Em cultivos de soja, as características arquiteturais das plantas, como estatura, densidade e disposição foliar, limitam a penetração e a cobertura das aplicações, sobretudo nos estratos médio e inferior, onde a ferrugem asiática se estabelece inicialmente (DEBORTOLI, 2012). A interceptação das gotas pela parte superior do dossel, aliada às condições meteorológicas adversas, pode reduzir significativamente a quantidade de ingrediente ativo que efetivamente atinge o alvo (CUNHA, 2010).

A tecnologia de aplicação, nesse contexto, assume papel fundamental para a eficácia do controle fitossanitário. Ajustes adequados no equipamento, como a escolha da ponta de pulverização, o volume de calda e a pressão de trabalho, devem ser feitos com base nas

ISBN 978-65-990392-6-3

características da cultura e nas condições ambientais (TORMEN, 2022). Tradicionalmente, pontas de jato plano padrão, que produzem gotas finas, são utilizadas devido à melhor cobertura superficial; no entanto, são mais suscetíveis à deriva. Alternativas como pontas de indução de ar e jato com pré-orifício produzem gotas maiores, reduzindo o risco de deriva, mas comprometendo a cobertura em regiões mais internas do dossel (CUNHA, 2006).

Estudos apontam que métodos convencionais de pulverização, mesmo com variação de volumes aplicados, apresentam baixa deposição nos estratos médios e inferiores da soja, frequentemente não ultrapassando 20% do volume total aplicado (HOFFMANN, 2016). Esse cenário impulsiona a busca por soluções que melhorem a penetração da calda no interior do dossel. Entre as tecnologias alternativas, destacam-se mecanismos auxiliares como cortinas de ar, barras de correntes e dispositivos de aplicação direcionada (MOURA, 2015).

O uso de pingentes aplicadores consiste em conduzir a calda diretamente para regiões inferiores da planta, superando barreiras foliares e atingindo locais de difícil acesso. Essa técnica, amplamente utilizada em culturas de espaçamento estreito, tem se mostrado promissora no aumento da cobertura e na eficiência biológica do controle de doenças como a ferrugem asiática (RÜEGG; TOTAL, 2013). Além disso, tecnologias de aplicação assistida por ar ou eletrostáticas também têm demonstrado potencial em melhorar a uniformidade da deposição e reduzir perdas por deriva (MERTENS, 2023; MOREIRA, 2013).

A necessidade de aprimoramento das técnicas de pulverização é reforçada pelo impacto econômico dos tratamentos fitossanitários, que representam de 25% a 30% do custo total de produção da soja (FREITAS, 2021). Assim, otimizar o controle químico da ferrugem asiática não apenas contribui para a preservação do potencial produtivo, mas também para a sustentabilidade econômica da cadeia produtiva.

As condições ambientais exercem papel determinante na eficiência da tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas, influenciando diretamente a deposição, cobertura e deriva das pulverizações. A temperatura elevada favorece a evaporação das gotas, reduzindo o volume efetivo que atinge o alvo biológico (CUNHA; ALVES, 2009). A umidade relativa do ar, quando baixa, intensifica esse processo de evaporação, comprometendo a penetração da calda nos estratos inferiores do dossel (MATUO *et al.*, 2019). Já o vento, em velocidades acima do recomendado, aumenta significativamente o risco de deriva, ocasionando perdas do produto e contaminação de áreas não alvo (NUYTTENS *et al.*, 2007). Nesse contexto, as mudanças climáticas, associadas ao aumento da variabilidade e intensidade desses fatores ambientais, tornam-se um desafio adicional para a agricultura, exigindo estratégias mais eficientes e sustentáveis de aplicação. Neste sentido, aplicar a calda em locais protegidos (terço inferior), pode contribuir para menores perdas por deriva e evaporação.

Diante do exposto, o presente estudo busca avaliar a eficiência da utilização do dispositivo auxiliar na aplicação visando o controle de doenças na soja. A hipótese é que, ao permitir maior penetração da calda no baixeiro da cultura, onde a doença se inicia, o pingente pode potencializar o efeito dos fungicidas e contribuir para a manutenção da sanidade das plantas até o final do ciclo produtivo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na safra 2024/25 em área de lavoura do Instituto Federal Farroupilha – Campus Frederico Westphalen localizada no município de Frederico Westphalen – RS, com coordenadas geográficas de latitude 27º23’33” S e Longitude 53º26’11” O e elevação a nível do mar de 496 metros, clima caracterizado por Köppen como Cfa subtropical úmido, com precipitação média anual de 2100mm e temperatura média de 19,1ºC, variando

ISBN 978-65-990392-6-3

entre mínimas de 0ºC e máximas de 38ºC (ALVARES et al. 2013). Durante a condução do experimento tivemos condições de precipitação contabilizado montante de 564,4 distribuídos nos 130 dias.

Solo do tipo Latossolo vermelho distrófico típico (EMBRAPA 2018), sendo que o mesmo apresentava as seguintes características químicas antes da implantação do experimento: teor de argila 60%; pH (H2O) 5,2; P 3,8 mg dm-3 (Mehlich-1); K 132 mg dm^{-3}; Ca 2+ 4,3 $cmolc/dm^{-3}$; Mg 2+ 2,7 $cmolc/dm^{-3}$; M.O. 2,6 %.

A cultura anterior a implantação do experimento foi um mix de plantas de cobertura contendo quatro espécies: nabo pivotante *Raphanus sativus* L.), aveia branca (*Avena sativa* L.), centeio (*Secale cereale*) e ervilha forrageira (*Pisum sativum* subsp. arvense). A cultivar de soja utilizada no experimento foi a Pioneer 95R40 IRPO, grau de maturação (GMR) 5,4 e crescimento indeterminado, altura média de plantas de 0,90m, ciclo médio de 125 dias.

Para a semeadura do experimento foi utilizada uma semeadora de arrasto da marca Vence Tudo modelo Serrana 5000, de 5 linhas espaçadas à 0,45 metros com linhas configuradas com disco de corte 16 polegadas, haste sulcadora para deposição do fertilizante na profundidade de 0,12 m, disco duplo de 13 e 14 polegadas para deposição das sementes na profundidade de 0,05 m e rodas de controle de profundidade e fechamento do sulco.

Para as aplicações dos tratamentos fitossanitários foi utilizado um pulverizador da marca Jacto, modelo Condor 600 AM12, com 12 m de comprimento de barra e bicos espaçados a 0,5m, acoplado ao sistema levante hidráulico de 3 pontos de trator da marca Massey Ferguson, modelo 4290 4 x 2 TDA.

O mecanismo auxiliar a barra de pulverização utilizado foi um “pingente” dispositivo semelhante a uma letra “ J ”, com 1,40 m de altura (comprimento) acoplado a barra de pulverização por meio de dois parafusos de fixação. O equipamento, penetra no dossel da cultura por entre as linhas de plantas e uma de suas extremidades é equipada com uma ponta de pulverização levemente direcionada para cima e que tem por objetivo atingir as folhas do interior do dossel da cultura. Uma chapa metálica com uma abraçadeira faz a fixação à barra do pulverizador, a haste do pingente é acoplada por meio de uma dobradiça e mola que permite que este se desarme quando esbarrar em algum obstáculo, a tubulação hidráulica passa por dentro da haste para evitar possíveis danos. Os dispositivos são acoplados há uma distância de 0,45m entre si, usando o mesmo espaçamento de semeadura da cultura

Foi realizada a dessecação pré-semeadura no dia 18/10/24 utilizando os produtos de nomes comerciais Glifosal (Glifosato) na dose de 3 L/ha + Heat (Suflafenacil) na dose de 80 g p.c./ha. O 1º tratamento fúngico foi realizado no dia 30/01/2025 com o produto comercial Vessarya na dose de 600 ml/ha, a 2ª aplicação fúngica realizada no dia 14/02/2025 usando o produto comercial Fox Pro na dose de 300 ml/ha e para o 3º tratamento fúngico foi usado o produto Mancozeb (Mancozebe 750 g/Kg) na dosagem de 2,5 kg/ha no dia 27/02/2025.

O ensaio foi conduzidono delineamento experimental em blocos ao acaso, no esquema bifatorial 4 x 3, com 4 repetições por tratamento. Onde foram utilizados 4 volumes de calda e 3 modos de aplicação. Os volumes de calda foram definidos em função de 4 velocidades de deslocamento do trator (MF 4290), sendo: V1 = 60L/ha (7,8 $km.h^{-1}$); V2 = 100L/ha (6,7 $km.h^{-1}$); V3 = 140L/ha (3,4 $km.h^{-1}$) e V4 = 180L/ha (2,8 $km.h^{-1}$), mantendo a mesma pressão de trabalho (2 bar) e 3 modos de aplicação: P1 = aplicação convencional; P2 = somente com os pingentes e P3 = combinação dos dois tratamentos anteriores. A barra de pulverização foi mantida à 0,50m acima do dossel da cultura.

Cada unidade experimental foi composta por 6 linhas de semeadura de 7 metros de comprimento, sendo considerada parcela útil as 4 linhas centrais (1,8 x 7m) de cada unidade experimental de 12,6 m^2. Entre cada parcela foi reservado um espaço de 5 metros, considerado como espaço de manobra, para aceleração, frenagem e troca de tratamento.

ISBN 978-65-990392-6-3

Leituras de umidade relativa do ar (UR, %) e temperatura do ar (ºC) foram mensuradas posicionando o termo-higrômetro a 1,0 m acima do solo e a velocidade do vento foi mensurada por um anemômetro a 0,50 m acima do dossel da cultura.

Para avaliação a deposição de calda nos estratos do dossel foi realizada a aplicação da calda contendo o corante marcador Azul Brilhante - INS 133 (Alimentari). Os depósitos da pulverização foram mensurados coletando-se aleatoriamente 2 trifólios por planta de 4 plantas das 4 linhas centrais de cada parcela, nas partes do terço superior (ponteiro), terço inferior (últimas folhas da parte inferior) e terço médio (folhas posicionadas entre o terço superior e o inferior) do dossel.

Após a aplicação e secagem do corante, as folhas foram retiradas das plantas, colocadas em sacos de plástico previamente identificados e levadas para o laboratório para a extração do marcador. A cada conjunto de 12 folhas de cada extrato do dossel, adicionaram-se 100 mL de água destilada, agitando-as levemente por 30 segundos, sendo o líquido lavado armazenado em tubo de ensaio.

Os depósitos foram quantificados em espectrofotômetro (Bioespectro – SP220), no comprimento de onda de 630 nm. Com a curva de calibração, obtida a partir de soluções-padrão, os dados de absorbância foram transformados em concentração (mg L-1) e, de posse da concentração inicial da calda e do volume de diluição das amostras, determinou-se a massa de corante retido nas folhas por meio da Equação 1.

$$Vi = (Cf \times Vf)/Ci \quad (1)$$

Em que:

Ci = concentração do corante na calda (1.500 mg L^{-1});

Vi = volume capturado pelo alvo (mL);

Cf = concentração do corante detectada no espectrofotômetro em absorbância (mg L^{-1}),

Vf = volume de diluição da amostra (100 mL).

Após a extração do corante, a área foliar foi determinada pelo “método dos discos”, retirando-se 2 discos de área conhecida de cada folha, os quais foram acondicionados em envelope de papel, o restante das folhas também foram acondicionados envelopes de papel e colocados em estufa de secagem com ventilação forçada a uma temperatura de 65ºC até atingirem peso constante, momento em que foram realizadas as pesagens, das folhas e discos, para cálculo da área foliar através da seguinte equação (CARON, *et al*. 2002) (2):

$$AF = (nº \text{ de discos} * AD * FSF)/FSD \quad (2)$$

Onde:

AF = Área foliar em m^2;

AD = área dos discos em m^2;

FSF = fitomossa seca das folhas (g);

FSD = fitomassa seca dos discos (g),

Para melhor apresentação dos dados, o volume retido em cada folha em mL foi transformado em µL e dividido pela sua respectiva área foliar obtendo-se, assim, a quantidade em µL cm^{-2}. Os dados do depósito foram ajustados para que a quantidade de corante pulverizada nas parcelas fosse igual a 165 g ha^{-1}, tomando-se como referência a taxa de aplicação de 100 L ha^{-1}. Para equiparar a quantidade de 165 g ha-1 do corante, foram multiplicados os valores dos depósitos encontrados nas parcelas que receberam a taxa de aplicação de 60 L ha^{-1} pelo fator de correção 1,65, as parcelas que receberam taxa de aplicação de 140 L ha^{-1}, o fator de 0,71 e as que receberam a taxa de aplicação de 180 L ha^{-1}, o fator de correção de 0,55. Dessa forma, todas as parcelas, independentemente da taxa de aplicação, foram corrigidas para receber a mesma quantidade de corante.

ISBN 978-65-990392-6-3

Para a análise estatística, os dados foram avaliados quanto a sua normalidade e homocedasticidade pelo teste de Shapiro-Wilk. As variáveis qualitativas e quantitativas foram submetidas à análise de variância ($p \leq 0,05$) e, respectivamente, ao teste de médias e à análise de regressão com o auxílio do programa estatístico Sisvar (FERREIRA, 2019).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados demonstram interação significativa entre o volume de calda e o local de aplicação apenas para a posição mediana (Tabela 1). As posições do terço inferior e terço superior da planta não apresentaram interação significativa entre o volume aplicado a posição da aplicação.

Tabela 1- Análise da anova com os valores de F calculado para os fatores de variação e sua interação nos locais de coleta das folhas.

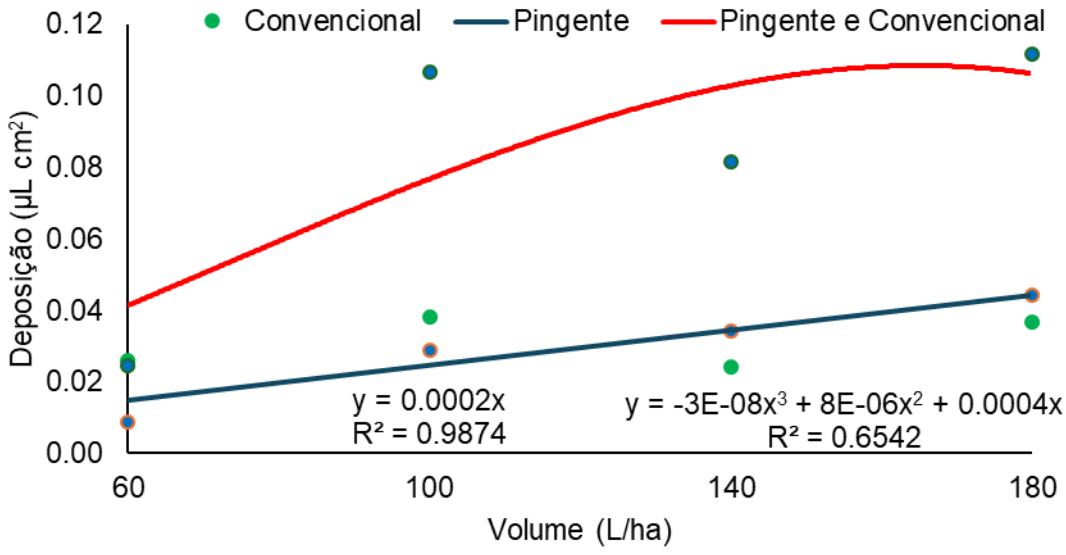
Fatores de variação	Local das folhas no dossel		
	Baixo	Médio	Superior
	---------- F calculado ----------		
Posição (P)	9,52	24,87*	1,37
Volume (V)	4,74	8,23*	0,84
P x V	1,35	2,56*	1,54

* Efeito significativo ($p \leq 0.05$).

Fonte: Autores (2025)

O uso do pingente resultou em maior deposição de calda no terço médio da planta com aumento crescente e linear conforme o aumento do volume de aplicação (Figura 1). Esse efeito é consistente com a função do pingente de aproximar e direcionar o jato para o interior do dossel, elevando a penetração e a quantidade de calda retida nessa região. Fernandes et al. (2010), mostram que a deposição cresce com o volume de aplicação, inclusive com comportamento linear em diferentes cenários, reforçando a tendência observada aqui.

Figura 1- Deposição de calda nas folhas de soja de acordo com o volume aplicado na situação convencional, com uso do pingente e com a utilização de ambos os sistemas.



Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

A utilização do pingente juntamente com a aplicação convencional, ou seja, a aplicação superior e inferior promove aumento da deposição de gotas no terço médio das plantas conforme aumenta o volume de aplicação até a estabilização com doses mais elevadas (Figura 1). A cobertura no estrato médio tende a crescer conforme o volume de calda é elevado, atingindo um patamar de estabilização em doses mais altas, devido ao escorrimento e à saturação foliar (CUNHA & TEIXEIRA, 2006; ANTUNIASSI et al., 2000).

A deposição de calda foi maior com a utilização do pingente auxiliando a aplicação convencional nos volumes de 100, 140 e 180 L/ha de calda (Tabela 2). Segundo Bueno *et al*. (2014), a utilização de dispositivos auxiliares como a barra auxiliar de pulverização, que aproxima o jato do alvo, tende a reduzir as perdas para o solo e manter níveis satisfatórios de deposição, em comparação à aplicação convencional.

Tabela 2- Deposição de calda em cada posição de aplicação e volume de aplicação no terço médio da cultura da soja.

Forma de aplicação	Volume de aplicação (L/ha)			
	60	100	140	180
Convencional (C)	0,026 a*	0,038 b	0,024 b	0,036 b
Pingente (P)	0,009 a	0,028 b	0,034 b	0,044 b
C e P	0,024 a	0,106 a	0,081 a	0,111 a

* Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$).

Fonte: Autores (2025)

O menor volume de aplicação não apresentou diferença significativa entre as formas de aplicação (Tabela 2). Boschini *et al*. (2008) demonstraram que a deposição aumenta progressivamente com o volume de calda (com valores maiores observados em 300 L/ha), indicando que volumes mais elevados tendem a gerar depósitos mais expressivos, dependendo da ponta e do extrato da folha.

4 CONCLUSÃO

O uso de pingente auxiliando a aplicação convencional melhora da deposição de calda no terço médio das plantas de soja.

O uso do pingente, isolado ou associado ao sistema convencional, melhora a deposição de gotas, nos volumes de 100, 140 e 180 L/ha.

REFERÊNCIAS

ALVES, L. B.; DA SILVA, C. A.; MEDEIROS, R. B. O avanço da monocultura de soja na Região Centro-Sul do Mato Grosso do Sul. **Entre-Lugar**, v. 13, n. 26, p. 149-170, 2022. DOI: https://doi.org/10.17921/1415-6254.2022v13n26p149-170. Disponível em: https://revista.entre-lugar.org/entre-lugar/article/view/149. Acesso em: 4 set. 2025.

AMARAL, N.; BATISTA, F. **Uso de adjuvantes na tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários na produção da soja**: uma revisão (Agronomia). Repositório Institucional, v. 2, n. 1, 2023. Disponível em: https://repositorio.institucional.br/handle/123456789/999. Acesso em: 4 set. 2025.

ANTUNIASSI, U. R. et al. **Tecnologias de aplicação em soja: efeito do volume e do posicionamento dos bicos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29., 2000, Viçosa. Anais [...]. Viçosa: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2000.

ARBO, M. et al. Ferrugem asiática no Brasil: impacto, avanços científicos e manejo. Revista Inovação: **Gestão e Tecnologia no Agronegócio**, v. 3, p. 27-56, 2024. Disponível em: https://revistainovacao.agr.br/article/view/27. Acesso em: 4 set. 2025.

BOSCHINI, P. et al. Deposição de pulverização em plantas de soja em diferentes estádios de desenvolvimento. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 55, n. 1, p. 17-24, 2008. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rceres/a/bcfQkN8W5. Acesso em: 4 set. 2025.

BUENO, M. R. et al. Pulverizador com barra auxiliar de arrasto e pulverizador de barra convencional em volumes reduzidos de aplicação de herbicida. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 457-464, 2014. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-83582014000200018. Disponível em: https://www.scielo.br/j/pd/a/Z4sN2Lr9k. Acesso em: 4 set. 2025.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO**. Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília, DF, v. 12, safra 2024/25, n. 5, fev. 2025. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras. Acesso em: 4 set. 2025.

CUNHA, J. P. A. R.; ALVES, G. S. Aplicabilidade das condições meteorológicas na tecnologia de aplicação de agrotóxicos. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 3, p. 564-573, 2009. Disponível em: https://www.scielo.br/j/eagri/a/TLxQ8v. Acesso em: 4 set. 2025.

CUNHA, J. P. A. R.; REIS, E. F.; SANTOS, R. O. Controle químico da ferrugem asiática da soja em função de ponta de pulverização e de volume de calda. **Ciência Rural**, v. 36, p. 1360-1366, 2006. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000400016. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cr/a/G9Z5cX. Acesso em: 4 set. 2025.

DA ROSA, G. F. et al. Monitoramento do inóculo para controle de ferrugem asiática no estado do Rio Grande do Sul durante a safra 2021/2022. RECIMA21 - **Revista Científica Multidisciplinar**, v. 4, n. 2, p. e422738, 2023. Disponível em: https://recima21.com.br/article/view/422738. Acesso em: 4 set. 2025.

FERNANDES, A. P. et al. Eficiência de diferentes ramais de pulverização e volumes de aplicação no controle de Brevipalpus phoenicis. **Revista Brasileira de Entomologia**, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/S0085-56262010000200007. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbent/a/N3rC6J. Acesso em: 4 set. 2025.

HOFFMANN, L. L. **Controle da ferrugem asiática da soja e suas relações com a planta, manejo e tecnologia de aplicação**. 2016. 176 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2016. Disponível em: https://repositorio.upf.br/handle/123456789/1123. Acesso em: 4 set. 2025.

HOFFMANN, L. L.; BOLLER, W.; FORCELINI, C. A. Fungicide spraying programs reducing Asian soybean rust impact on soybean yield components. **Journal of Agricultural Science**, v. 14, n. 3, p. 40-52, 2022. DOI: https://doi.org/10.5539/jas.v14n3p40. Disponível em: https://ccsenet.org/journal/index.php/jas/article/view/40. Acesso em: 4 set. 2025.

ISBN 978-65-990392-6-3

MATUO, T.; MOURA, E. A.; BALAN, M. G. Influência de fatores meteorológicos na eficiência das pulverizações agrícolas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, e5657, 2019. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbca/a/f3sG5K. Acesso em: 4 set. 2025.

MERTENS, T. B. **Avaliação do sistema EletroVortex na deposição e deriva física em aplicação de fungicida na cultura do algodão**. 2023. 56 p.

MOREIRA, C. A. F. **Depósito de pulverização em diferentes sistemas de semeadura de soja no manejo da ferrugem asiática**. 2013.

MOURA, B. de. **Deposição de fungicida em cultivares de soja com diferentes hábitos de crescimento, controle e sensibilidade de Phakopsora pachyrhizi a fungicidas**. 2015. 148 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2015. Disponível em: https://repositorio.upf.br/handle/123456789/1144. Acesso em: 4 set. 2025.

MOURA, S. S. **Monitoramento por aerobiologia e estratégias de manejo da resistência a fungicidas em Phakopsora pachyrhizi, o patógeno da ferrugem asiática da soja**. 2024. 74 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2024. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/handle/11449/56789. Acesso em: 4 set. 2025.

NUYTTENS, D. et al. Spray drift as influenced by spray application technology: A review. **Crop Protection**, v. 26, p. 661-670, 2007. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219406001700. Acesso em: 4 set. 2025.

RÜEGG, J.; TOTAL, R. Dropleg – application technique for better targeted sprays in row crops: introduction and hints for growers and advisers. Wädenswil: **Agroscope**, 2013. 27 p. Disponível em: https://www.agroscope.admin.ch/dropleg.pdf. Acesso em: 4 set. 2025.

SFAIR, M. J.; NIELSEN FILHO, P. R.; ANTONOWISKI, M. Influência da aplicação de fungicidas em diferentes horários e condições climáticas na cultura da soja (*Glycine max*) no município de Irineópolis-SC. **Acidentes Botrópicos em Bovinos no Brasil**, v. 84, p. 107, 2025.

TORMEN, N. R. et al. Deposição de gotas no dossel e controle químico de Phakopsora pachyrhizi na soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 802-808, 2012. DOI: https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000800010. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/9Mf5gk. Acesso em: 4 set. 2025.

UNHA, J. P. A. R.; TEIXEIRA, M. M. Avaliação de estratégias de aplicação em soja: volume de calda, pontas de pulverização e deposição em diferentes estratos. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 2, p. 474-482, 2006. Disponível em: https://www.scielo.br/j/eagri/a/y72C6s. Acesso em: 4 set. 2025.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 72

EFEITOS DA DESSECAÇÃO PRÉ-COLHEITA NA PERDA DE COLHEITA E NA QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE SOJA

Effects of Pre-Harvest Desiccation on Harvest Loss and Physiological Quality of Soybean Seeds

Renan Mariotti[1]; Gilvan Moisés Bertollo[1]; Marcelo Luiz Seibert[1]; Stela Mariz Kulczynski[1]; Luís Albarello[1]; Nícolas Panciera Cabral[1]; Matheus Piovezan[1]; Luiz Henrique Baptista Velho[1]

[1] Departamento de Ciências Agronômicas e Ambientais, Universidade Federal de Santa Maria campus Frederico Westphalen, R. Sete de Setembro, s/n, Frederico Westphalen–RS, Brasil,

renan.mariotti@acad.ufsm.br, Gilvan.bertollo@ufsm.br, marcelo.seibert@acad.ufsm.br, stela.kulczynski@ufsm.br, luis.albarello@acad.ufsm.br, Nicolas.cabral@acad.ufsm,br, mateuspiovesan28@gmail.com, luiz.velho@acad.ufsm.br

RESUMO

O estudo buscou avaliar os efeitos da dessecação em pré-colheita sobre as perdas de colheita e a qualidade das sementes de soja. A pesquisa foi realizada em duas etapas: a campo, no município de Palmeira das Missões-RS, e em laboratório, no campus da Universidade Federal de Santa Maria em Frederico Westphalen-RS. O cultivar utilizado foi Neo 610 IPRO, semeado em 20/11/2023, com população de 250.000 sementes ha^{-1} e aplicação do herbicida YONON. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em parcelas subdivididas, considerando quatro horários de colheita (10h, 13h, 16h e 19h), em soja dessecada e não dessecada, com três repetições. As análises foram feitas no programa SISVAR, pelo teste de Tukey a 5%. Os resultados mostraram que os horários mais quentes e secos do dia, entre 13h e 16h, aumentaram as perdas de grãos e reduziram a viabilidade das sementes devido a danos mecânicos e fisiológicos. Com base nesses achados, concluo que a regulagem correta da colheitadeira e a escolha de horários mais amenos, principalmente após as 18h, são práticas essenciais para reduzir perdas, preservar a qualidade fisiológica das sementes e garantir maior eficiência no processo de colheita da soja.

Palavras-chave: Soja; pré-colheita; vigor de sementes.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effects of pre-harvest desiccation on harvest losses and soybean seed quality. The research was carried out in two stages: in the field, in Palmeira das Missões-RS, and in the laboratory, at the Federal University of Santa Maria, Frederico Westphalen campus. The cultivar used was Neo 610 IPRO, sown on November 20, 2023, at a density of 250,000 seeds ha^{-1}, with the herbicide YONON applied. The experimental design was completely randomized, in split plots, with four harvest times (10 a.m., 1 p.m., 4 p.m., and 7

ISBN 978-65-990392-6-3

p.m.), in desiccated and non-desiccated soybeans, with three replications. Data were analyzed using SISVAR software with Tukey's test at 5% probability. Results indicated that the hottest and driest hours of the day, between 1 p.m. and 4 p.m., caused higher grain losses and reduced seed viability due to mechanical and physiological damage. Based on these findings, I conclude that proper harvester adjustment and harvesting at milder times of the day, especially after 6 p.m., are essential practices to minimize losses, preserve seed quality, and ensure greater efficiency in soybean harvesting.

Keywords: Soybean; pre-harvest; seed vigor.

1 INTRODUÇÃO

A soja é uma das principais commodities agrícolas brasileiras e exerce papel estratégico na balança comercial. O estado do Rio Grande do Sul, destaca-se na produção dessa leguminosa em nível nacional, sendo o quinto maior produtor brasileiro de grãos, com uma área plantada na safra (2022/2023) de 6.555 milhões de hectares, com uma produção de 13.018,4 toneladas de grãos de soja (CONAB, 2023). De acordo com Santos (2022), a cultura da soja tem grande representatividade no cenário agrícola mundial, sendo que o foco das pesquisas é o desenvolvimento de novas tecnologias que permitam tornar a produção mais eficiente e sustentável. A fertilização tem papel fundamental no desenvolvimento vegetal, pois fornece os nutrientes em quantidades adequadas para que a planta cresça e atinja o estágio reprodutivo para formação de grãos com a qualidade e quantidade esperadas. A produção de soja é de extrema importância global, servindo como uma das principais matérias-primas para a alimentação animal e humana, além de ser um componente essencial na produção de biocombustíveis. Sua relevância se deve ao seu alto teor de óleo e proteínas.

O cultivo é sensível a fatores de manejo, sendo que perdas na colheita e a qualidade fisiológica das sementes são pontos críticos para a sustentabilidade da produção. O estudo da maturação das sementes é essencial para determinar o momento ideal de colheita e garantir a preservação de sua qualidade. A fase de maturação corresponde ao período em que as sementes ainda se desenvolvem na planta mãe. A atualização fisiológica, por sua vez, marca o momento em que a semente se desconecta da planta, estando pronta para a colheita. Permanecer em campo por mais tempo, especialmente sob condições climáticas desfavoráveis, pode comprometer a qualidade fisiológica das sementes (MARCOS-FILHO, 2015). De acordo com Mayer et al. (2014), a ocorrência de chuvas após a maturidade fisiológica, combinada com altas temperaturas, reduz a qualidade das sementes, enquanto o uso de dessecação pré-colheita pode diminuir sua germinação e vigor. Tsukahara et al. (2016) observaram que atrasos na colheita, associados a altos volumes de chuva e altas temperaturas, impactam os níveis de produtividade da soja.

Desse modo, a prática de dessecação é utilizada para antecipar a colheita da soja, mas é fundamental que essa técnica seja realizada no momento correto para evitar perdas de produtividade. O estágio R7, e mais precisamente a subdivisão R7.3, é indicado como o período ideal para a dessecação em pré-colheita. Nesse estádio, os grãos de soja alcançam seu teor máximo de matéria seca, e a planta apresenta cerca de 75% de folhas e vagens amarelas (ADEGAS et al, 2018). Realizar a dessecação nesse momento ajuda a garantir que a antecipação da colheita não afete os níveis de produtividade da cultura. A dessecação em pré-colheita surge como técnica para uniformizar a maturação e reduzir o ciclo produtivo, mas seu impacto na qualidade fisiológica das sementes ainda é motivo de discussão. Dessa forma, este

ISBN 978-65-990392-6-3

estudo buscou avaliar a influência da dessecação sobre as perdas na colheita e a qualidade fisiológica das sementes de soja, contribuindo com informações aplicáveis ao manejo agrícola.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O trabalho foi realizado em duas etapas: a primeira foi realizada em campo e a segunda em laboratório. Em campo foi utilizado uma área no município de Palmeira das Missões-RS, região do Alto Uruguai do RS, entre as coordenadas geográficas de 27°55'32.7" (S) e 53°25'50.8" (W), aproximadamente 520 m de altitude, 1.919 mm de precipitação média anual, e 19˚C de temperatura média anual em (INMET 2023/2024), com um solo caracterizado argiloso com características – LG (EMPRAPA 1999). A segunda etapa foi realizada no Laboratório de Fitopatologia e Nematologia da Universidade Federal de Santa Maria, no campus de Frederico Westphalen RS. A região possui clima subtropical úmido (Cfa - Köppen), com precipitação média anual de 1800 mm e temperatura média de 19 °C. Dados retirados e analisados no ano de 2023.

2.2 Coleta, Processamento e Análise de Dados

A cultivar de soja utilizada foi a Neo 610 IPRO (NEOGEN). A semeadura ocorreu em 20/11/2023, com população de 250.000 sementes por hectare, equivalente a 11,25 sementes por metro linear (24,99 sementes por metro quadrado), em espaçamento de 45 cm, adotando-se o sistema de plantio direto. Após a colheita, a produção média da cultivar foi de 3.000 kg ha^{-1} (50 sacas ha^{-1}). Foi utilizado 300 kg ha-1 de adubação química na linha, formulação 04-30-18 (NPK), e mais 120 kg ha-1 de KCL aplicado pré semeadura, sendo espalhado a lanço.

O ingrediente ativo do herbicida aplicado para dessecante pré-colheita é o Glufosinato-sal de-Amônio (200g/L, 20,0% m/v), na dosagem de 400 g i.a ha-1. O equipamento utilizado para a aplicação do herbicida foi um Uniport 2500 STAR da marca Jacto, com 28 metros de barra, espaçamento de 50 cm entre pontas de aplicação, aplicado a uma vazão de 100 L/ha-1 e com a ponta de pulverização tipo leque (modelo AVI 110-02), aplicado nas primeiras horas da tarde, com uma pressão de 50 bares.

A colheita da soja foi realizada na data de 21/04/2024, de forma mecânica, o equipamento utilizado foi uma colheitadeira New Holland TC 57 fabricada no ano de 2007, e suas regulagens para realizar a colheita foram a mesmas para todos dic, às regulagens foram: velocidade que a máquina realizou a colheita de 2,4 km/h, a rotação do cilindro foi de 660 RPM, a distância do cilindro para o côncavo foi de 13,90 mm, a rotação do ventilador foi de 620 RPM, a peneira superior estava com uma abertura de 12,08 mm, no 14˚dente, já a peneira inferior estava com uma abertura de 8,59 mm, no 10˚ dente, velocidade do molinete foi de 21 RPM, altura do molinete ao solo foi de 72,3 cm e com uma distância de 36 cm do caracol, e a altura média das plantas foi de 1,08 m, representado na figura 1.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 1- Abertura das peneiras superior (A) e inferior (B), distância entre Cilindro ecôncavo (C).



Fonte: Autores (2025)

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), em esquema de parcelas subdivididas, no qual a parcela principal correspondeu à dessecação da soja (com e sem dessecação), e a subparcela aos horários distintos de colheita (10h, 13h, 16h e 19h). Dessa forma, os fatores de estudo foram organizados em um esquema fatorial 2 × 4, com três repetições. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o programa computacional SISVAR.

Para mensurar as perdas em cada tratamento, foram feitas duas coletas: a primeira para quantificar a perda pré-colheita, onde grãos dispersos no chão foram recolhidos em uma área de 1 m²; e a segunda para contabilizar as perdas na plataforma e no sistema de separação, utilizando um gabarito de 5,18 m por 0,39 m, totalizando 2 m². Para analisar as perdas na plataforma e no sistema de separação, a colheitadeira percorria 30 m e, ao parar, as sementes perdidas na plataforma eram coletados entre a própria plataforma e o pneu dianteiro, enquanto as perdas do sistema de separação eram coletadas 10 m após o pneu traseiro. Paralelamente, amostras de sementes foram retiradas do elevador de descarga, acondicionadas em sacos de papel Kraft e identificadas de acordo com o tratamento.

Para contabilizar os valores de vigor, viabilidade, e danos, as sementes foram submetidas ao teste de tetrazólio, conforme metodologia descrita por França Neto et al. (1999). Na condução do teste, foram retiradas 100 sementes de cada amostra, e sendo divididas em duas subamostras de 50 sementes, as quais foram condicionadas em gerbox, devidamente esterilizados, em papel germitest umedecidos, com quantidade de água equivalente a 2,5 vezes seu peso seco, e colocadas em uma incubadora BOD por 24h, a uma temperatura de 25˚C.

Posteriormente, as sementes foram depositadas em copo becker de vidro, adicionado à solução na concentração de 0,075% de 2,3,5-trifenilcloreto-de-tetrazólio, e mantidas no escuro, na estufa a uma temperatura de 40˚C. Após as amostras permanecerem 180 min, foram retiradas da estufa, sendo lavadas com água corrente para retirar o sal tetrazólio, e armazenadas em um refrigerador, sendo realizada a avaliação de forma imediata. Os resultados foram avaliados por meio da análise de variância a 5 % de significância, utilizando o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

ISBN 978-65-990392-6-3

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

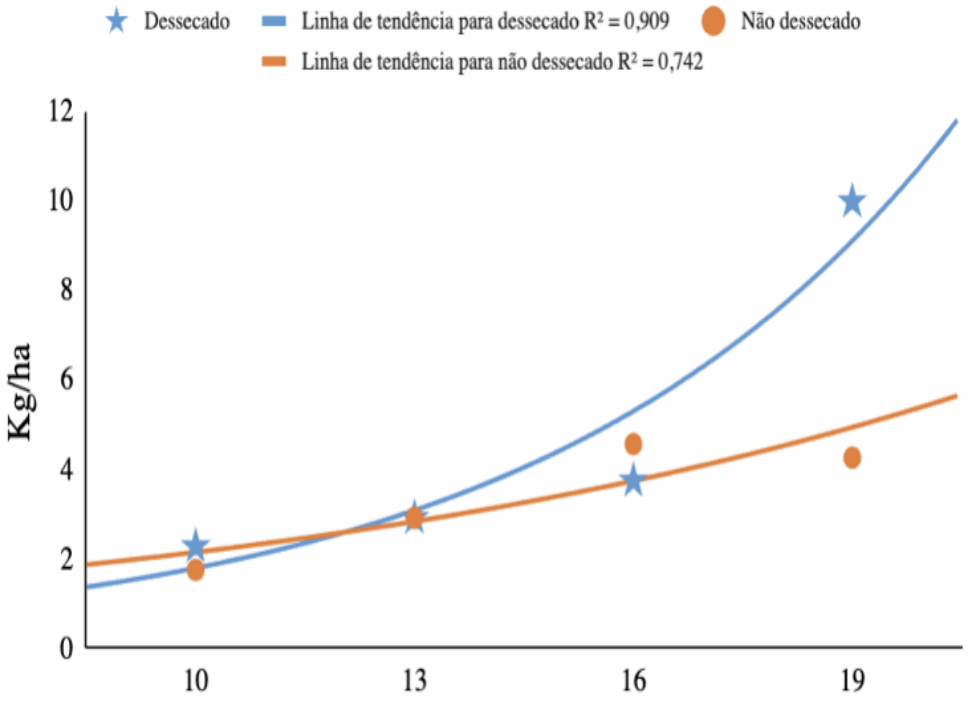
3.1 Perdas na colheita

As perdas na lavoura apresentaram variações ao longo do dia, com os menores percentuais registrados no início da manhã. As perdas aumentaram a partir das 13h, mantendo- se em um nível constante até as 19h. A menor perda de grãos de soja no período da manhã está relacionada a fatores ambientais, como a umidade relativa do ar. A umidade da noite torna as plantas e os grãos mais flexíveis, reduzindo as perdas por fragmentação e desprendimento durante a colheita. À medida que a temperatura aumenta ao longo do dia e a umidade diminui, os grãos se tornam mais frágeis, o que leva a um aumento das perdas.

O aumento das perdas de grãos à tarde ocorre devido à queda da umidade relativa do ar e ao aumento da temperatura. Conforme Costa e Souza (2019), essas condições promovem a rápida secagem de grãos e vagens, tornando-os mais quebradiços e suscetíveis a perdas na colheita mecanizada. A manutenção das perdas elevadas até o fim da tarde sugere que os grãos não recuperam a umidade perdida. Pires et al. (2021) e Silva et al. (2022) recomendam a colheita em períodos mais úmidos do dia, como parte de uma estratégia de manejo para otimizar a produtividade e minimizar o desperdício.

Na Figura 2 abaixo, são apresentadas as perdas que ocorreram na plataforma no decorrer da colheita, mostrando os resultados obtidos para a soja nos tratamentos dessecado e não dessecado. A análise de variância (ANOVA) indicou interação significativa entre os fatores em estudo: dessecação (Fator A) e horários de colheita (Fator B). Isso demonstra que o efeito dos horários sobre as perdas de grãos depende da condição de dessecação, e vice-versa. Dessa forma, os resultados foram interpretados considerando-se a interação, com destaque para as diferenças entre plantas dessecadas e não dessecadas ao longo do dia.

Figura 2 - Perdas que a máquina teve na plataforma no decorrer da colheita



Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

A análise da perda de grãos de soja revelou que as plantas que não passaram pelo processo de dessecação apresentaram, em geral, menores índices de perdas. Essa variação, no entanto, é fortemente influenciada pelos horários de colheita e por fatores ambientais. As perdas foram menores no início da manhã para a soja não dessecada, devido à umidade residual que mantém os grãos mais flexíveis e resistentes à quebra. Por outro lado, a soja dessecada demonstrou maior sensibilidade e perdas mais elevadas a partir das 13h, quando o aumento da temperatura e a queda da umidade do ar intensificam a fragilidade dos grãos. Isso reforça a importância de adaptar o manejo da colheita, priorizando horários mais frescos e úmidos, para minimizar as perdas e otimizar a eficiência da produção.

A análise das perdas de grãos de soja evidenciou que as plantas não dessecadas apresentaram, de modo geral, menores índices de perdas ao longo do dia. Essa diferença está relacionada principalmente às condições ambientais, já que no início da manhã a maior umidade relativa do ar mantém os grãos mais flexíveis e resistentes à quebra, reduzindo o desperdício. Por outro lado, a soja dessecada mostrou maior sensibilidade a partir do início da tarde, quando a elevação da temperatura e a redução da umidade intensificam a fragilidade dos grãos, resultando em maiores perdas. Esses resultados reforçam a importância de ajustar o manejo da colheita, priorizando horários mais frescos e úmidos para aumentar a eficiência da operação e reduzir desperdícios.

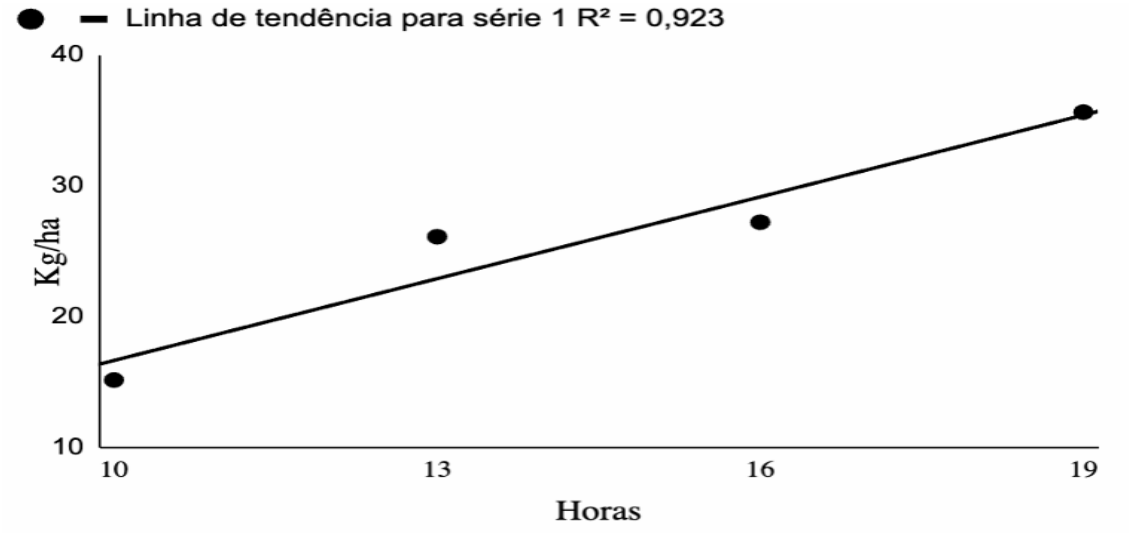
Em contrapartida, as perdas aumentam significativamente a partir do período da tarde. O avanço do dia e o consequente aumento da temperatura e diminuição da umidade relativa do ar levam a uma secagem mais rápida dos grãos, tornando-os mais frágeis e propensos à quebra e ao desprendimento durante a colheita mecanizada, como evidenciado por Costa e Souza (2019). Essa tendência de perdas elevadas se mantém até as 19h, indicando que a umidade não é recuperada, e reforça a recomendação de Pires et al. (2021) de realizar a colheita em períodos de maior umidade para preservar a integridade dos grãos.

A eficiência da colheita está, portanto, ligada ao manejo da operação com base nas condições climáticas. Tanto Pires et al. (2021) quanto Silva et al. (2022) sugerem que a definição de horários específicos para a colheita é uma estratégia eficaz para os produtores que buscam otimizar a produtividade e reduzir perdas excessivas. Além disso, estudos de Schanoski, Righi e Werner (2011) e Cunha e Zandbergen (2007) revelam que a maior parte das perdas (75% a 85%) ocorre na plataforma de corte, com uma parcela menor atribuída aos mecanismos internos da colheitadeira, reforçando a importância do ajuste e manutenção deste componente.

A análise estatística das perdas totais indicou efeito significativo dos horários de colheita ($p < 0,05$). As menores perdas foram registradas às 10h, variando entre 10 e 20 kg ha^{-1}, diferindo estatisticamente das colheitas realizadas à tarde. A partir das 13h observou-se aumento progressivo das perdas, atingindo os maiores valores às 19h, entre 30 e 40 kg ha^{-1}. Esse comportamento confirma a influência das condições ambientais no decorrer do dia, com a redução da umidade relativa do ar e o aumento da temperatura favorecendo a fragilidade dos grãos. Os resultados reforçam a importância de concentrar a operação de colheita em períodos mais úmidos do dia, de modo a reduzir perdas e aumentar a eficiência operacional, representado na figura 3.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 3 - Valores das perdas totais desde a pré-colheita na plataforma.



Fonte Autores (2025)

A análise das perdas totais em colheitas mecanizadas, conforme a figura, aponta para uma forte relação com as condições climáticas e a umidade dos grãos. Os dados indicam que o início da manhã se mostra como o período mais eficiente para a colheita, com perdas variando entre 15 e 25 kg/ha.

Em contraste, o avanço do dia traz um cenário de aumento das perdas totais, que podem atingir entre 40 e 50 kg/ha no final da tarde, de acordo com Almeida e Freitas (2022). Esse aumento é atribuído à elevação da temperatura e à queda da umidade relativa do ar, que causam a rápida desidratação dos grãos, tornando-os mais rígidos e vulneráveis à quebra. Além disso, Moura e Batista (2019) e Ferreira et al. (2023) complementam que as perdas são intensificadas pelo desgaste e pela expansão térmica dos componentes mecânicos das colheitadeiras, fatores que comprometem a eficiência operacional.

Esses resultados sublinham a necessidade de adaptar o manejo da colheita em função das condições climáticas diárias. A definição de horários específicos para a operação, priorizando períodos mais frescos e úmidos, é uma estratégia fundamental para reduzir perdas e otimizar a produtividade no campo. A adequação do manejo, conforme sugerido pelos autores, é uma prática vantajosa para maximizar a eficiência e a lucratividade na produção de soja.

A comparação das perdas entre os tratamentos dessecado e não-dessecado é observada na Tabela 1. Nota-se que a soja dessecada teve maiores perdas ao longo das horas especialmente as 19 horas foi mais acentuada, quando comparado com a soja não dessecada. A análise das perdas totais demonstrou efeito significativo para os horários de colheita ($p < 0,05$), evidenciando menores perdas no período da manhã e aumento progressivo ao longo do dia. Observou-se interação entre os fatores horário e dessecação, sendo que a soja dessecada apresentou médias superiores às do tratamento não dessecado, principalmente às 19h, quando as perdas atingiram 9,99 kg ha^{-1} contra 4,27 kg ha^{-1}. Os resultados indicam que a dessecação antecipada aumenta a suscetibilidade à quebra dos grãos e que a realização da colheita em horários mais frescos e úmidos reduz significativamente as perdas, configurando-se como prática essencial para otimizar a eficiência operacional.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 1 - Comparativo entre os tratamentos de soja dessecado e não dessecado

Horário	Dessecado	Não Dessecado
10	2,28a*	1,76a
13	2,92a	2,92a
16	3,75a	4,57a
19	9,99a	4,27b

Fonte: Autores (2025)

Uma análise comparativa entre a soja dessecada e não dessecada mostra que a dessecação pode afetar negativamente a integridade dos grãos. Embora a dessecação acelere e uniformize a colheita, a redução da umidade nos grãos e na planta os torna mais suscetíveis a perdas e quebras, especialmente em horários mais quentes, como os observados entre 13h e 19h (Rodrigues et al., 2020; Oliveira e Gonçalves, 2021). A soja não dessecada, por sua vez, tende a reter mais umidade, mantendo os grãos mais flexíveis e resistentes ao impacto mecânico, o que pode resultar em menores índices de perdas, conforme Souza et al. (2022) e Costa e Mendes (2019).

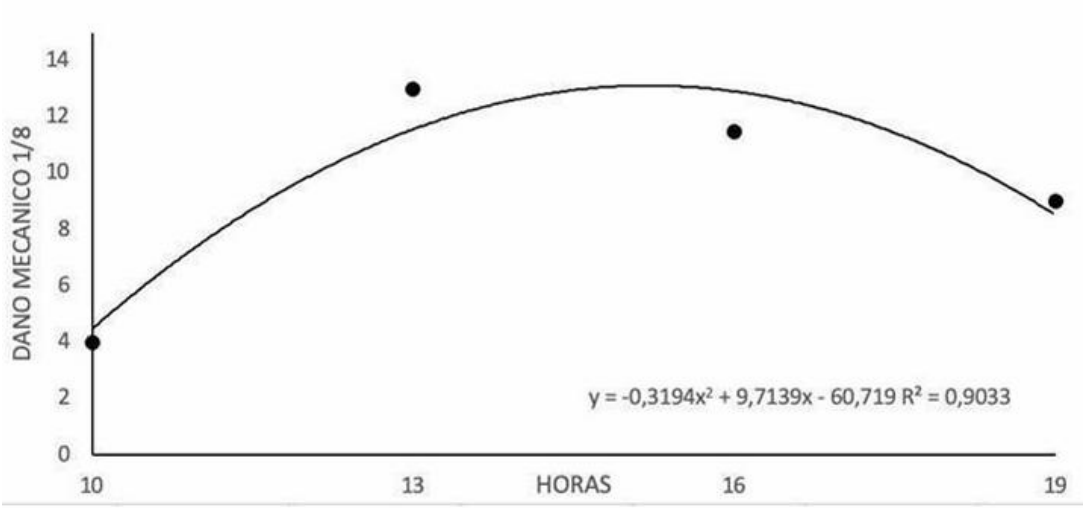
Essa diferença é confirmada pelos resultados de viabilidade das sementes. O teste de tetrazólio demonstrou que a colheita realizada às 10h resultou em sementes com maior viabilidade e menos danos mecânicos, devido às condições de umidade elevada e temperaturas mais baixas (Ferreira; Matos, 2022). Em contraste, o período entre 13h e 16h foi o mais crítico, com o calor e a menor umidade relativa do ar tornando as sementes mais frágeis e vulneráveis a danos, conforme explicado por Carvalho et al. (2021) e Silva et al. (2020). Curiosamente, a viabilidade das sementes melhorou novamente por volta das 19h, o que pode ser atribuído à queda de temperatura e umidade mais estável (Rodrigues; Lima, 2021).

Em resumo, a dessecação, embora benéfica para o manejo, exige uma consideração cuidadosa do horário de colheita. Os dados sugerem que a soja dessecada deve ser colhida em períodos de menor calor, enquanto a não dessecada pode ser manejada em horários intermediários, visando minimizar a quebra dos grãos e maximizar a viabilidade das sementes.

Na figura 4, verifica-se que o dano mecânico, classificado como 1/8, as sementes ainda estão viáveis para serem comercializadas. Nos horários analisados, verificou-se que no início da manhã (10 horas) foi baixo, no entanto, conforme as horas progrediam, observou-se um crescente nos danos, mais precisamente entre até as 16 horas, quando começaram a reduzir novamente.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 4 - Dano mecânico 1/8



Fonte: Autores (2025)

3.2 Qualidade fisiológica das sementes

O dano mecânico em sementes de soja é um fator crítico para a manutenção da qualidade e viabilidade pós-colheita. Conforme Nascimento et al. (2022), esses danos, causados por impacto e fricção das máquinas, estão diretamente ligados à umidade relativa do ar. O texto indica que a maior umidade, presente em horários mais frescos, atua como um protetor natural, tornando os grãos mais flexíveis e menos suscetíveis à quebra.

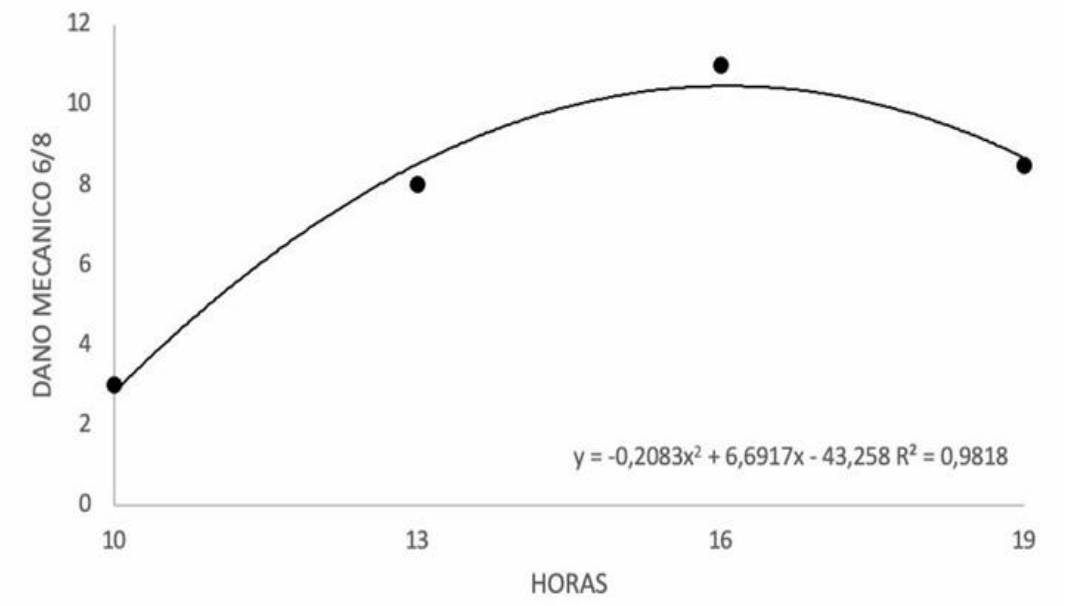
Isso explica a redução dos danos mecânicos após as 16h (Figura 5), quando a temperatura começa a cair e a umidade aumenta, melhorando a flexibilidade das sementes. Em contraste, os maiores índices de danos, levando à inviabilidade das sementes (classificação 6/8), foram novamente observados no período mais quente do dia, entre 13h e 16h, quando a maior fragilidade dos grãos é evidente. Assim, o ajuste do horário de colheita é fundamental para mitigar os danos e preservar a qualidade das sementes.

No período da tarde, especialmente entre as 13h e 16h, observa-se uma acentuada degradação na qualidade das sementes de soja, uma vez que o aumento da temperatura e a redução da umidade do ar resultam na desidratação dos grãos. Conforme a literatura, como em Silva et al. (2023), a perda de água torna as sementes mais frágeis e suscetíveis a danosmecânicos durante o processo de colheita, comprometendo sua resistência física e, consequentemente, sua comercialização.

A inviabilidade das sementes, um fenômeno amplamente estudado, não se restringe apenas aos danos físicos visíveis. É o resultado de uma interação complexa entre os fatores ambientais e o impacto mecânico da colheitadeira. Como atestam diversos autores como Marcos-Filho (2005) e Ramos e Silva (2012), os horários críticos de operação, particularmente os de pico de calor, intensificam a fragilidade dos grãos, tornando-os mais vulneráveis a danos severos. O aumento da temperatura do solo e do ambiente neste período eleva a suscetibilidade das sementes, reforçando a necessidade de uma gestão cuidadosa do horário de colheita para preservar a qualidade e o potencial de viabilidade do material colhido e a importância de alinhar as operações de colheita com as condições ambientais para preservar a qualidade das sementes, demonstrado na figura 6 os danos sofridos.

ISBN 978-65-990392-6-3

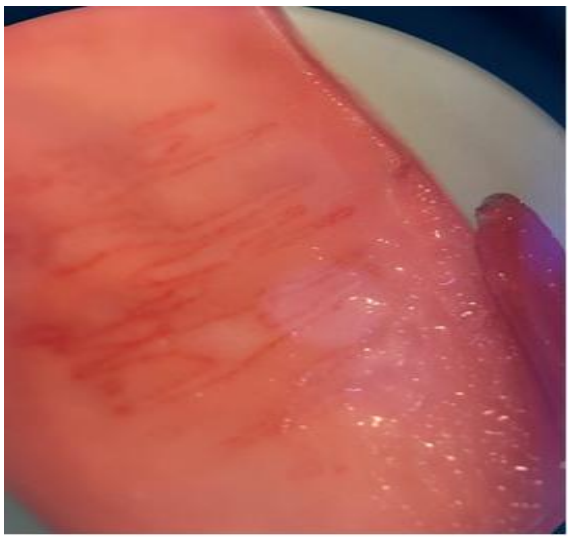
Figura 5 - Dano mecânico 6/8 (mais agregados) inviabilizam a semente



Fonte: Autores (2025)

Se o grão está mais suscetível a danos mecânicos devido à umidade, o contato com agregados, como torrões de terra ou detritos, pode causar danos ainda mais graves. Isso é bem crítico, especialmente para sementes com maior teor de água, que são mais vulneráveis a quebras e à perda de viabilidade.

Figura 6 - Dano por umidade sofrido pelo grão



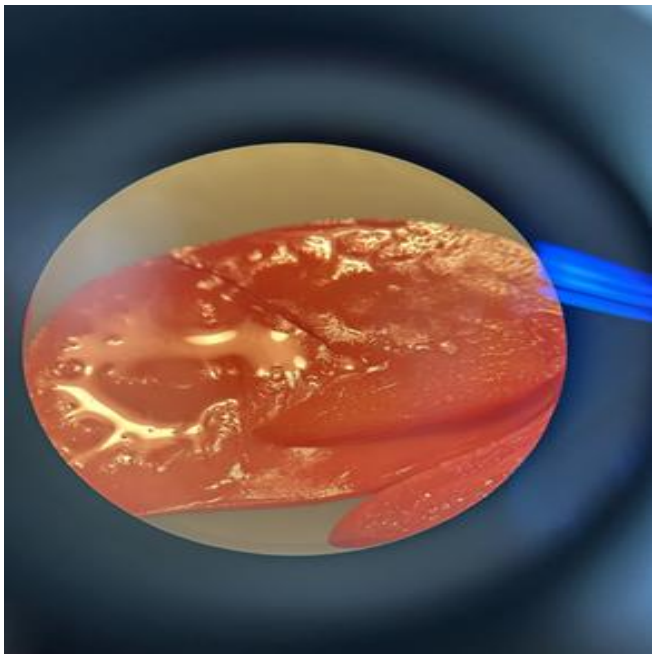
Fonte: Autores (2025)

Além disso, o tipo de solo também influencia bastante. Em solos mais argilosos e compactos, os torrões podem ser maiores e mais duros, aumentando a pressão sobre as sementes e os danos mecânicos. Outro ponto é que, em horários mais quentes, as máquinas podem ser operadas com mais intensidade, o que agrava o problema. É tipo uma reação em

ISBN 978-65-990392-6-3

cadeia: as condições ambientais pioram, a semente fica mais frágil e a máquina, em alta rotação, acaba machucando ainda mais o grão. É por isso que é tão importante ficar de olho no horário e no ajuste da colheitadeira.

Figura 7 - Dano mecânico sofrido pelo grão.



Fonte Autores (2025)

Outro aspecto relevante para o aumento dos danos mecânicos nas sementes de soja é o processo de dessecação. Na Tabela 2 pode ser observado os resultados comparativos entre a soja dessecada e a não dessecada ao longo do dia demonstram que a dessecação impacta negativamente a integridade dos grãos. Diferentemente dos demais resultados, a soja dessecada apresentou um desempenho inferior, com menores danos no início da manhã (10h) e um aumento progressivo até o final da tarde (19h), em contraste com a soja não dessecada. Isso sugere que, embora a dessecação auxilie no manejo e na logística da colheita, ela pode tornar a semente mais suscetível a danos mecânicos em horários com condições ambientais adversas.

Tabela 2 - Comparativo dos resultados de danos por umidade na soja dessecada e não Dessecada.

	Horas			
	10	13	16	19
Dessecado	16 b	1,7b	20 b	37 a
Não- Dessecado	39 a	39 a	34 a	47 a

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (p ≥ 5%)

ISBN 978-65-990392-6-3

Fonte Autores (2025)

A análise comparativa entre a soja dessecada e a não dessecada revela que a resiliência das sementes aos danos mecânicos está intrinsecamente ligada ao seu estado fisiológico. A soja não dessecada, ao manter seus processos metabólicos, demonstra uma maior capacidade de adaptação às variações de temperatura e umidade, o que a torna mais resistente a danos ao longo do dia (Fowler,2009). Em contrapartida, a soja dessecada, sob estresse fisiológico, apresenta vulnerabilidade maior, com danos se intensificando especialmente entre 13h e 19h, período em que a combinação de estresse hídrico e térmico se torna mais severa (Ramos e Silva, 2012).

Adicionalmente, os danos causados por percevejos emergem como um fator crucial na inviabilidade das sementes. O padrão de ocorrência desses danos, com picos no início e no final do dia, sugere uma correlação com a atividade da praga e as condições climáticas. Além do dano físico direto, que compromete a estrutura da semente, a ação dos percevejos facilita a transmissão de patógenos, como fungos do gênero Fusarium spp., o que reduz significativamente a qualidade e a capacidade de germinação (Dias et al., 2018).

Esses danos, sejam de origem mecânica ou biológica, comprometem a qualidade fisiológica das sementes, impactando diretamente o vigor das plântulas e a taxa de germinação, conforme observações de Bastos et al. (2016). Em suma, a viabilidade das sementes de soja é um resultado complexo de múltiplos fatores, destacando a necessidade de uma abordagem de manejo integrada, que considere tanto a otimização dos horários de colheita quanto o controle eficaz de pragas para garantir a qualidade e o sucesso da safra.

4 CONCLUSÃO

O estudo avaliou os efeitos da dessecação pré-colheita sobre perdas de colheita e qualidade fisiológica de sementes de soja cultivar Neo 610 IPRO, conduzido em Palmeira das Missões-RS e no laboratório da UFSM, campus Frederico Westphalen. Utilizou-se delineamento inteiramente casualizado, em parcelas subdivididas, com quatro horários de colheita e três repetições.

Os resultados indicaram que a dessecação aumentou a suscetibilidade dos grãos à quebra, especialmente entre 13h e 16h, quando temperaturas elevadas e baixa umidade relativa intensificaram os danos mecânicos e fisiológicos. As menores perdas ocorreram no início da manhã, favorecendo sementes com maior viabilidade e menor dano.

Conclui-se que o manejo adequado do horário de colheita e o ajuste correto da colheitadeira são essenciais; recomenda- se ao produtor realizar a colheita de soja dessecada preferencialmente no início da manhã ou final da tarde, quando as condições ambientais preservam a integridade dos grãos e maximizam a eficiência operacional.

ISBN 978-65-990392-6-3

REFERÊNCIAS

ADEGAS, F.S.; MOREIRA, A.; PÍPOLO, A.E.; LORINI, I.; GAZZIERO, D.L.P.; HENNING, F.A.; OLIVEIRA, M.A.; MANDARINO, J.M.G.; BETIOLI JR, E.; FURLANETTO, R.H. Efeitos da época de dessecação de pré-colheita na produtividade da soja. VIII Congresso Brasileiro de Soja,. **Anais ...**, Goiânia, GO, Junho 2018.

AGUILA, L. S. H. D; AGUILA, J. S. D; THEISEN, G. **Perdas na colheita na cultura da soja**. 2011.

AMARAL, W.C.de O.; SOBRINHO, W.B. R. Análise das características operacionais das perdas na colheita mecanizada de soja em uma fazenda localizada no município de Monte do Carmo-TO. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.9, n.12, p. 31677-31691, dec., 2023.

AZEVEDO, Mateus et al. Aplicação de diferentes herbicidas para dessecação em pré- colheita de soja. **Agrarian**, v. 8, n. 29, p. 246-252, 2015.

BELINE, H. et al. Cultura da soja: receita não realizada das perdas evitáveis durante a colheita. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Custos-ABC**. 2008.

BOTELHO, F. J. E.; OLIVEIRA, J. A.; PINHO, É. V. R. V.; CARVALHO, E. R.; FIGUEIREDO, Í. B. D.; ANDRADE, V. Qualidade de sementes de soja obtidas de diferentes cultivares submetidas à dessecação com diferentes herbicidas e épocas de aplicação. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa vista, v. 10, n. 2, p. 137 - 144, 2016.

BULOW, R. L.; SILVA, C. T. A. C. Dessecantes aplicados na pré-colheita na qualidade fisiológica de sementes de soja. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v. 1, n. 1, p. 67-75, 2012.

CELLA, V.; SILVA, J. F.; DE AZEVEDO, P. H.; AZEVEDO, V. H.; HOFFMAN, L. L. Efeito da dessecação em estádios fenológicos antecipados na cultura da soja. **Bioscience Journal**, Uberlandia, v. 30, n. 5, p. 1364-1370, 2014.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira - grãos safra 2022/2023**. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos. Acesso em: 2 nov, 2024.

DE SOUZA SILVA, W. et al. Colheita mecanizada de soja em função da plataforma de corte em área com e sem dessecação. **Científic@-Multidisciplinary Journal**, v. 10, n. 1, p. 1-9, 2023.

ISBN 978-65-990392-6-3

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja - Paraná – 2005**. EMBRAPA Soja. Londrina, 2005. 224 p. (Sistemas de Produção/EMBRAPA Soja, n.5), 2005.

EMBRAPA. **Métodos para monitorar colheita de soja evita desperdícios bilionários no Paraná**. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/60006870/metodo--para-monitorar-colheita-de-soja-evita-desperdicio-bilionario-no-parana. Acesso em 28 out, 2024.

FARIAS, J. R.B et al.. Antecipação e retardamento de colheita nos teores de óleo e proteína das sementes de soja, cultivar Valiosa RR. **Scientia Agropecuária**, v. 8, n. 2, p. 99-107, 2017.

FRANÇA-NETO, J.B. et al.. **Tecnologia da produção de semente de soja de alta qualidade**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 82p.

FREITAS, M.C.M. A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, vol.7, n.12; 2011.

GUIMARÃES, V. F.; HOLLMANN, M. J.; FIOREZE, S. L.; ECHER, M. M.; RODRIGUES-COSTA, A. C. P.; ANDREOTTI, M. Produtividade e qualidade de sementes de soja em função de estádios de dessecação e herbicidas. **Planta Daninha**, v. 30, n. 3, p. 567-573, 2012.

L.F.; ABATTI, C.; BERTAGNOLLI, P.F.; CAVASSIM, J.E.; GABE, H.L.; KUREK, A.; MATSUMOTO, M.N.; OLIVEIRA, M.A.R.; PITOL, C.; PRADO, L.C.; STECKLING, C. Understanding soybean maturity groups in Brazil: environment, cultivar classification, and stability. **Crop Science**, v. 49, p. 801-808, 2009.

LAMEGO, F.P. et al. Dessecação pré-colheita e efeitos sobre a produtividade e qualidade fisiológica de sementes de soja. **Planta Daninha** [online]. 2013, v. 31, n. 4, pp. 929-938.

MARCANDALLI, L. H.; LAZARINI, E.; MALASPINA, I. C. Épocas de aplicação de dessecantes na cultura da soja: qualidade fisiológica de sementes. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 33, n. 2, p. 241 - 250, 2011.

MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Londrina: ABRATES, 2015. 659p.

MATHIAS, V.; PEREIRA, T.; MANTOVANI, A.; ZÍLIO, M.; MIOTTO, P.; COELHO, C. M. M. Implicações da época de colheita sobre a qualidade fisiológica de sementes de soja. Revista **Agro@mbiente**, v. 11, n. 3, p. 223-231, jul./set., 2017.

ISBN 978-65-990392-6-3

MAYER, J. F., RUFFATO, S., BONALDO, S. M., ARFELI, M. J. Avaliação da qualidade de grãos de soja em função da época de colheita no norte de Mato Grosso. In: XLIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRICOLA, 2014. **Anais...** Campo Grande/MS, 2014.

MESQUITA, C. M. et al. **Manual do produtor**: Como evitar desperdícios nas colheitas de soja, do milho e do arroz (32 p.). EMBRAPA, Londrina, PR. 1998.

NETO, P. R.; ROSSI, L. F. S. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em fritura. **Química Nova**, v.23, p. 4, 2000.

OLIVEIRA, I. G.. **Dessecação Pré-Colheita de soja e performance fisiológica de sementes no armazenamento**. 2022. 50f. Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia de Sementes – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

PENARIOL, A. **Soja**: cultivares no lugar certo. Informações Agronômicas, v. 90, p. 13-14, 2000.

PEREIRA, T et al. Chemical desiccation for early harvest in soybean cultivars. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 4, p. 2383-2394, 2015.

SAMOGIM, E. M. et al. Desempenho de dois tipos de plataforma de colhedora de soja. **Scientific Electronic Archives**, 2020.

SANTOS, F. L.; BERTACINI, F.; SOUZA, J. S.; SIMÕES, I.; BOSSOLANI, J. W.; SÁ, M. E. A influência de dessecante na qualidade fisiológica de sementes de soja. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 12, n. 1, p. 68-76, 2018.

SILVA, C. L. O., EZIQUIEL, D. S., MUÇOUÇAH, M. F. S. A Infraestrutura Brasil para o escoamento de safras no agronegócio. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 11, p. 109701–109717, 2021.

SUBEDI, Maya; WILLENBORG, Christian J.; VANDENBERG, Albert. Influence of harvest aid herbicides on seed germination, seedling vigor and milling quality traits of red lentil (Lens culinaris L.). **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 311, 2017

TOSTA, P. C. S. et al. **Colheita mecanizada de soja**: determinação do índice de perdas, 2022.

SUKAHARA, R. Y.; FONSECA, I. C. B.; SILVA, M. A. A.; KOCHINSKI, E. G.; NETO, J. P.; SUYAMA, J. T. Produtividade de soja em consequência do atraso da colheita e de condições ambientais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 51, n. 8, p. 905-915, ago., 2016.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 73

EFICIÊNCIA DA APLICAÇÃO DE FUNGICIDAS COM PINGENTES NA CULTURA DA SOJA COM O USO DE SENSORIAMENTO REMOTO

Efficiency of Fungicide Application Using Pendants in Soybean Crops with the Use of Remote Sensing

Nícolas Panciera Cabral[1]; Gilvan Moisés Bertollo[1]; Marcelo Luiz Seibert[1]; Emanuel Araujo Silva[1]; Luís Albarello[1]; Renan Mariot[1]; Matheus Piovesan[1]; Guilherme Natalli Farias[1]

[1]Departamento de Ciências Agronômicas e Ambientais, Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen, R. Sete de Setembro, s/n, Frederico Westphalen–RS, Brasil, nicolas.cabral@acad.ufsm,br, gilvan.bertollo@ufsm.br, marcelo.seibert@acad.ufsm.br, emanuel.araujo@ufsm.br, luis.albarello@acad.ufsm.br, renan.mariotti@acad.ufsm.br, mateuspiovesan28@gmail.com, guilherme.natalli@acad.ufsm.br

RESUMO

O cultivo da soja tornou-se um dos principais commodities no Brasil, impulsionando melhorias na produção. Contudo, plantas daninhas, insetos e doenças fúngicas podem reduzir a produtividade ou inviabilizar o cultivo. Cerca de 40% dos produtos para controle de patógenos são desperdiçados por falhas de penetração no dossel vegetativo, resultando em doses baixas ou inexistentes nos estágios avançados, tornando-o atrativo para doenças. A pesquisa visou usar drone de imageamento para monitorar a fitossanidade de plantas submetidas à pulverização com pingentes adaptados ao trator, focando na aplicação no terço inferior da cultura. O experimento, em blocos ao acaso (fatorial 4 × 3), avaliou volumes de calda (60–180 L ha^{-1}) e modos de aplicação. Foram analisadas deposição foliar, índice VARI e produtividade. Embora sem diferenças estatísticas, volumes menores favoreceram a deposição e os pingentes mostraram potencial para melhorar a cobertura no dossel, com o sensoriamento remoto auxiliando no diagnóstico fitossanitário

Palavras-chave: Tecnologia de aplicação, Pulverização, Drone de imageamento.

ABSTRACT

Soybean cultivation has become one of Brazil's leading commodities, driving improvements in production. However, weeds, insects, and fungal diseases can reduce productivity or even make cultivation unfeasible. Around 40% of products intended for pathogen control are wasted due to failures in canopy penetration, resulting in extremely low or nonexistent doses in advanced growth stages, making the canopy more susceptible to fungal infections. This study aimed to use imaging drones to monitor the phytosanitary status of plants sprayed with tractor-adapted pendulum nozzles, targeting application in the lower third of the crop. The experiment, arranged in a randomized block design (4 × 3 factorial), evaluated spray volumes (60–180 L ha^{-1}) and application methods. Leaf deposition, VARI index, and yield were analyzed. Although no statistical differences were found, lower volumes favored deposition, and the pendulum nozzles showed potential to improve canopy coverage, with remote sensing aiding in phytosanitary diagnosis.

Keywords: Soybean, Pendulum spraying, Imaging drone.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

O cultivo da soja no Brasil tem o seu maior destaque em sua produção em larga escala, tornando-se em uma das principais comodities do país e ocupando um papel importante na economia nacional e na comercialização internacional. O Brasil está entre as principais figuras na exportação de grãos, recebendo uma parcela significativa no abastecimento global.

A soja é uma das principais fontes de óleo vegetal e proteína, tornando-se essencial na parte de nutrição humana e animal, além do abastecimento de indústrias de biocombustíveis, ressaltando ainda mais a necessidade aprimoramento do seu cultivo e a aplicação de manejos eficientes e sustentáveis para a rentabilidade cultural e o avanço da competitividade global com o seu comércio.

A produtividade da soja vem sendo frequentemente comprometida por doenças fúngicas, dando ênfase aos estágios reprodutivos, onde o dossel vegetativo está parcialmente fechado, dificultando a penetração e a deposição uniforme do fungicida.

Essa deficiência se situa no terço médio e inferior do dossel vegetativo, gerando um microclima com uma maior umidade e com pouca entrada de raios solares, tornando-se um ambiente favorável ao surgimento de patógenos agressivos à cultura. Entre das principais doenças fúngicas, destaca-se a ferrugem-asiática (*Phakopsora pachyrhizi),* que teve o seu primeiro aparecimento nos anos 2000 em lavouras comerciais, gerando severos danos ao limbo foliar, acarretando desfolhamento precoce e a alta redução fotossintética da planta, reduzindo drasticamente o seu teto produtivo.

A corrida pela busca de princípios ativos que controlassem o patógeno e principalmente por formas de aplicações, pois conforme Lidório (2021), cerca de 40% dos produtos aplicados para o controle de doenças são perdidos, muitas vezes pela tecnologia de aplicação ser desprezada pelos produtores, devido à falta de conhecimento, por negligência na aplicação ou até mesmo por equívocos nas aplicações.

Conforme Cunha (2014), apesar das descobertas de produtos com uma determinada eficiência de controle do fungo em um ambiente controlado, no campo as dificuldades de controle permanecem, muito devido às formas de aplicação destes fungicidas.

A aplicação de um defensivo quando feita de forma e momento errado, é sinônimo de prejuízo financeiro e, provável contaminação humana e ambiental, além de possibilitar a resistência dos patógenos, conforme citado por Eggers (2020).

Por isso, a ênfase em fazer o uso de tecnologias de aplicações com o intuito de melhorar a uniformidade da distribuição dos princípios ativos vem se tornando cada vez mais importante, junto com estudos que propõem o uso de barras de arrasto que passam sobre o dossel da cultura, melhorando a penetração e a uniformidade dos produtos aplicados, conforme descreve Cunha (2014).

Para superar essa limitação, a adaptação de “pingentes” na barra de pulverização tem sido investigada como alternativa viável. O pingente consiste em uma mangueira ou extensão acoplada à ponta de pulverização, permitindo a aplicação direta de fungicida no terço médio e inferior do dossel vegetativo. Essa configuração favorece a deposição de gotas nas folhas baixeiras e no terço médio, ampliando o espectro de cobertura e potencializando a eficácia do controle químico. A tecnologia é de fácil adaptação em pulverizadores já existentes, apresenta baixo custo e pode ser associada a diferentes volumes e tipos de bicos, atendendo às demandas específicas de cada lavoura.

Aliado a isso, o uso de drones para imageamento agrícola, equipados com sensores e câmera, tem se consolidado como ferramenta promissora no monitoramento fitossanitário. Esses equipamentos capturam imagens capazes de gerar índices de vegetação, como o VARI (Índice Visível Resistente à Atmosfera), que identificam variações no vigor das plantas antes

ISBN 978-65-990392-6-3

que sintomas visíveis sejam detectados a campo. Com essa abordagem, é possível mapear áreas com estresse biótico ou abiótico e direcionar intervenções, otimizando o uso de defensivos e reduzindo custos operacionais. A integração entre a aplicação direcionada com pingentes e o monitoramento remoto por drones potencializa o manejo de doenças na soja, permitindo respostas rápidas e eficientes, com maior assertividade no uso de insumos e preservação da fitossanidade.

O estudo tem como objetivo monitorar a fitossanidade da cultura da soja por meio de imagens adquiridas com drone equipado com câmera para geração do índice VARI (Índice Visível Resistente à Atmosfera). As imagens processadas no software Metashape e interpretadas no software QGIS, permitindo a identificação de variações no vigor vegetativo e a detecção precoce de áreas com possível estresse fitossanitário. Essa abordagem visa correlacionar as informações obtidas via sensoriamento remoto com a eficiência da aplicação de fungicidas, realizada por meio da tecnologia do pingente, e possui a meta de aumentar a eficiência do controle de doenças com o máximo rendimento econômico e resultado físicos e químicos satisfatórios, com o mínimo de dano ambiental e sem causar riscos à saúde humana, possibilitando uma avaliação integrada e precisa do manejo adotado.

A hipótese é que o uso integrado de drones para obtenção de imagens aéreas verticais e geração do índice VARI (Índice Visível Resistente à Atmosfera), junto com software de interpretações destas imagens, aliado à aplicação de fungicidas com tecnologia do pingente, resulte em uma contraprova de que o uso da tecnologia de aplicação realiza uma maior uniformidade de cobertura foliar no terço médio e inferior do dossel da soja, promovendo melhor controle fitossanitário e incremento na produtividade em relação à pulverização convencional.

A pesquisa tem como objetivo, integrar a tecnologia de drones de imageamento ao meio rural, passando a atuar como um sistema de suporte na hora de tomada de decisões, definindo a severidade do patógeno e a entrada com a aplicação de fungicidas. No contexto, a tecnologia do pingente complementa junto ao diagnóstico gerado pelo sensoriamento remoto, uma aplicação de alcance e precisão ao terço médio e inferior do dossel vegetativo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Foram conduzidos dois experimentos em área de lavoura do Instituto Federal Farroupilha – Campus Frederico Westphalen localizada no município de Frederico Westphalen – RS, com coordenadas geográficas de latitude 27º23’33” S e Longitude 53º26’11” O e elevação a nível do mar de 496 metros, conforme a figura 1. O clima é caracterizado por Köppen como *Cfa* subtropical úmido, com precipitação média anual de 2100mm e temperatura média de 19,1ºC, variando entre mínimas de 0ºC e máximas de 38ºC (Alvares et al. 2013). Durante a condução dos dois experimentos tivemos condições de precipitação e umidade relativa do ar (Figura 1), 726,8mm distribuídos nos 119 dias e na safra de 2024/25, 564,4 distribuídos nos 130 dias, conforme a figura 2.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 1 – Imagem aérea da área experimental.



Fonte: Autores (2025)

Solo do tipo Latossolo vermelho distrófico típico (EMBRAPA 2018), sendo que o mesmo apresentava as seguintes características químicas antes da implantação do experimento: teor de argila 60%; pH (H_2O) 5,2; P 3,8 mg dm^{-3} (Mehlich^{-1}); K 132 mg dm^{-3}; Ca $^{2+}$ 4,3 cmolc/dm^{-3}; Mg $^{2+}$ 2,7 cmolc/dm^{-3}; M.O. 2,6 %.

A cultura anterior a implantação dos experimentos foi um mix de plantas de cobertura contendo quatro espécies: nabo pivotante (*Raphanus sativus* L.), aveia branca (*Avena sativa* L.), centeio (*Secale cereale*) e ervilha forrageira (*Pisum sativum* subsp. arvense). A cultivar de soja utilizada nos dois experimentos foi a Pioneer 95R40 IRPO, grau de maturação 5,4 e crescimento indeterminado, altura média de plantas de 0,90m, ciclo médio de 125 dias.

Para a semeadura de ambos os experimentos foi utilizada uma semeadora de arrasto da marca Vence Tudo modelo Serrana 5000, de 5 linhas espaçadas à 0,45 metros com linhas configuradas com disco de corte 16 polegadas, haste sulcadora para deposição do fertilizante na profundidade de 0,12 m, disco duplo de 13 e 14 polegadas para deposição das sementes na profundidade de 0,05 m e rodas de controle de profundidade e fechamento do sulco.

Para as aplicações dos tratamentos fitossanitários foi utilizado um pulverizador da marca Jacto, modelo Condor 600 AM12 com 12 m de comprimento de barra e bicos espaçados a 0,5m, acoplado ao sistema levante hidráulico de 3 pontos de trator da marca Massey Ferguson, modelo 4290 4x2 TDA.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2 - Distribuição da precipitação pluviométrica, temperatura média e umidade relativa do ar dos experimentos das safras 2023/24 e 2024/25.



Fonte: Adaptado de INMET (2025)

O mecanismo auxiliar a barra de pulverização utilizado foi um “pingente” dispositivo semelhante a uma letra “J” com 1,40 m de altura (comprimento) acoplado a barra de pulverização por meio de dois parafusos de fixação. O equipamento, penetra no dossel da cultura por entre as linhas de plantas e uma de suas extremidades é equipada com uma ponta de pulverização levemente direcionada para cima e que tem por objetivo atingir as folhas do interior do dossel da cultura. Uma chapa metálica com uma abraçadeira faz a fixação à barra do pulverizador, a haste do pingente é acoplada por meio de uma dobradiça e mola que permite que este se desarme quando esbarrar em algum obstáculo, a tubulação hidráulica passa por dentro da haste para evitar possíveis danos. Os dispositivos são acoplados há uma distância de 0,45m entre si, usando o mesmo espaçamento de semeadura da cultura, conforme a figura 3.

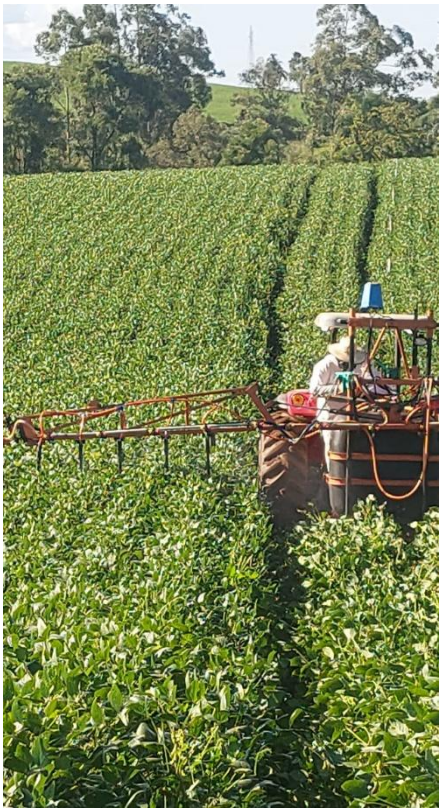
Para o experimento 1, da safra 2023/24, a dessecação pré-semeadura da soja foi realizada em 24/11/2023 utilizando os produtos Xeque-mate (Glisfosato – sal de potássio) dose de 2,5 l/ha e Heat (Suflafenacil) na dose de 50 g p.c./ha. A implantação do experimento foi realizada no dia 13/12/2023, semeado no final da janela recomendada, com população de 311.000 plantas/hectare ou 14 sementes/metro linear, considerando 10% de falhas de germinação e outras perdas, restando um stand de 280.000 plantas.

Foram realizados os seguintes tratamentos fúngicos com a utilização do pingente: 1º tratamento no dia 12/02/23 usando o produto comercial Vessarya (Picoxistrobina 100 g/L + Benzovindiflupir 50 g/L + Acetofenona 142 g/L) na dose de 700 ml/ha; 2º tratamento no dia 01/03/2023 utilizando o produto comercial Fox Pro (Bixafem 125 g/L + Protioconazol 175 g/L +

ISBN 978-65-990392-6-3

Trifloxistrobina 150 g/L) na dose de 0,5 L/ha; 3º tratamento no dia 15/03/2023 usando o produto Unizeb gold (Mancozebe 750 g/Kg) na dosagem de 2,5 kg/ha.

Figura 3 – Utilização do pingente acoplado a barra de pulverização



Fonte: Autores (2025)

As demais aplicações em pós-emergência foram realizadas conforme cronograma de aplicações da lavoura implantada ao lado, sendo realizado um controle em pós-emergência da cultura com produto Preciso xK (Glifosate) na dose de 3 L/ha, para controle de plantas daninhas, mais o inseticida Expedition (Sulfloxaflor 100 g/L + Lambda-cialotrina 150 g/L) na dose de 300 mL/ha.

Para o experimento 2, conduzido na safra 2024/25 foi realizada a dessecação pré-semeadura no dia 18/10/24 utilizando os produtos Glifosal (Glifosato) na dose de 3 L/ha + Heat (Suflafenacil) na dose de 80 g p.c./ha, semeadura, usando a mesma cultivar do ano anterior, realizada no dia 26/11/2024 com a mesma população. O 1º tratamento fúngico foi realizado no dia 30/01/2025 com o produto comercial Vessarya na dose de 600 ml/ha, a 2ª aplicação fúngica realizada no dia 14/02/2025 usando o produto comercial Fox Pro na dose de 300 ml/ha e para o 3º tratamento fúngico foi usado o produto Mancozeb (Mancozebe 750 g/Kg) na dosagem de 2,5 kg/ha no dia 27/02/2025.

Os ensaios (dois anos) foram conduzidos no delineamento experimental em blocos ao acaso, no esquema bifatorial 4 x 3, com 4 repetições por tratamento. Onde foram utilizados 4 volumes de calda e 3 modos de aplicação. Os volumes de calda foram definidos em função de 4 velocidades de deslocamento do trator (MF 4290), sendo: V1 = 60L/ha (7,8 km.h^{-1}); V2 =

ISBN 978-65-990392-6-3

100L/ha (6,7 km.h^{-1}); V3 = 140L/ha (3,4 km.h^{-1}) e V4 = 180L/ha (2,8 km.h^{-1}), mantendo a mesma pressão de trabalho (2 bar) e 3 modos de aplicação: P1 = aplicação convencional; P2 = somente com os pingentes e P3 = combinação dos dois tratamentos anteriores. A barra de pulverização foi mantida à 0,50m acima do dossel da cultura.

Cada unidade experimental foi composta por 6 linhas de semeadura de 7 metros de comprimento, sendo considerada parcela útil as 4 linhas centrais (1,8 x 7m) de cada unidade experimental de 12,6 m^2. Entre cada parcela foi reservado um espaço de 5 metros, considerado como espaço de manobra, para aceleração, frenagem e troca de tratamento. As condições ambientais no momento das aplicações foram mensuradas com um termo-higrô-anemômetro. Leituras de UR e temperatura do ar foram mensuradas posicionando o termo-higrômetro a 1,0 m acima do solo e a velocidade do vento a 0,50 m/s acima do dossel da cultura.

Para as avaliações das características de produtividade foram coletadas 10 plantas aleatoriamente em cada unidade experimental, das quais foram avaliadas o número de legumes por planta, número de grãos por planta, massa de grãos por planta e massa de mil grãos, o restante da unidade experimental foi colhido e trilhado e sua umidade corrigida para percentual e efetuado cálculo da produtividade em quilogramas/hectare.

Para avaliação a deposição de calda nos estratos do dossel foi realizada a aplicação da calda contendo o corante marcador Azul Brilhante - INS 133 (Alimentari). Os depósitos da pulverização foram mensurados coletando-se aleatoriamente 2 trifólios por planta de 4 plantas das 4 linhas centrais de cada parcela, nas partes do terço superior (ponteiro, terço inferior (últimas folhas da parte inferior) e terço médio (folhas posicionadas entre o terço superior e o inferior) do dossel.

Após a aplicação e secagem do corante, as folhas foram retiradas das plantas, colocadas em sacos de plástico previamente identificados e levadas para o laboratório para a extração do marcador. A cada conjunto de 12 folhas de cada extrato do dossel, adicionaram-se 100 mL de água destilada, agitando-as levemente por 30 segundos, sendo o líquido lavado e armazenado em tubo de ensaio.

Os depósitos foram quantificados em espectrofotômetro (Bioespectro – SP220), no comprimento de onda de 630 nm. Com a curva de calibração, obtida a partir de soluções-padrão, os dados de absorbância foram transformados em concentração (mg L-1) e, de posse da concentração inicial da calda e do volume de diluição das amostras, determinou-se a massa de corante retido nas folhas por meio da [eq. (1)]:

$$Vi = (Cf \times Vf) / Ci \quad (1)$$

em que,

Ci = concentração do corante na calda (1.500 mg L^{-1});

Vi = volume capturado pelo alvo (mL);

Cf = concentração do corante detectada no espectrofotômetro em absorbância (mg L^{-1}),

Vf = volume de diluição da amostra (100 mL).

Após a extração do corante, a área foliar foi determinada pelo “método dos discos”, retirando-se 2 discos de área conhecida de cada folha, os quais foram acondicionados em envelope de papel, o restante das folhas também foram acondicionados envelopes de papel e colocados em estufa de secagem com ventilação forçada a uma temperatura de 65ºC até atingirem peso constante, momento em que foram realizadas as pesagens, das folhas e discos, para cálculo da área foliar através da seguinte equação (2):

$$AF = (nº \text{ de discos} * AD * FSF) / FSD \quad (2)$$

Onde: AF = Área foliar em m^2; AD = área dos discos em m^2; FSF = fitomossa seca das folhas (g); FSD = fitomassa seca dos discos (g), conforme Caron (2002).

ISBN 978-65-990392-6-3

Para melhor apresentação dos dados, o volume retido em cada folha em mL foi transformado em µL e dividido pela sua respectiva área foliar obtendo-se, assim, a quantidade em µL cm^{-2}. Os dados do depósito foram ajustados para que a quantidade de corante pulverizada nas parcelas fosse igual a 165 g ha^{-1}, tomando-se como referência a taxa de aplicação de 100 L ha^{-1}. Para equiparar a quantidade de 165 g ha^{-1} do corante, foram multiplicados os valores dos depósitos encontrados nas parcelas que receberam a taxa de aplicação de 60 L ha^{-1} pelo fator de correção 1,65, as parcelas que receberam taxa de aplicação de 140 L ha^{-1}, o fator de 0,71 e as que receberam a taxa de aplicação de 180 L ha^{-1}, o fator de correção de 0,55. Dessa forma, todas as parcelas, independentemente da taxa de aplicação, foram corrigidas para receber a mesma quantidade de corante.

Para a análise estatística, os dados foram avaliados quanto a sua normalidade e homocedasticidade pelo teste de Shapiro-Wilk. As variáveis qualitativas e quantitativas foram submetidas à análise de variância ($p \leq 0,05$) e, respectivamente, ao teste de médias e à análise de regressão com o auxílio do programa estatístico Sisvar, conforme Ferreira (2019).

2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados

Na interpretação e processamento das imagens foi utilizado um notebook Acer Aspire 5, junto com os softwares Metashape e QGIS, cujas etapas de análise estão em recortar a área de interesse, aplicar cálculos raster para criar uma diferença de solo e parte vegetativa, logo após a geração do filtro VARI e o recorte dos blocos. Ao recortar os blocos, foi realizado uma estatística zonal, aplicando média, mediana, desvio padrão, mínimo, máximo e variância, com o objetivo de resumir o comportamento do índice espectral VARI dentro de cada bloco, permitindo comparar quais tratamentos ou blocos foram mais homogêneos ou apresentaram melhores valores médios de vigor das plantas.

2.3 Imageamento aéreo com drone

As imagens aéreas foram adquiridas por meio de um veículo aéreo não tripulado (VANT) de marca DJI, modelo Phantom 4, onde o plano de voo foi feito no aplicativo Dronedeploy e configurado para realizar o voo a 100 metros de altura, com recobrimento lateral e longitudinal de 80%, conforme a figura 4. O processamento foi realizado no software Agisoft Metashape Professional.

O processamento seguiu as etapas padrão do software, todas configuradas com qualidade High, utilizando os parâmetros default disponibilizados pela ferramenta. As etapas executadas foram:

Alinhamento das imagens (Align Photos): realizado em qualidade High, com o parâmetro padrão de acurácia (Accuracy = High) e detecção automática de pontos de ligação (Key point limit = 40.000; Tie point limit = 4.000).

Construção da nuvem de pontos densa (Build Dense Cloud): gerada em qualidade High, com profundidade padrão (Depth filtering = Mild).

Geração do Modelo Digital de Superfície (MDS) (Build DEM): criado a partir da nuvem de pontos densa, mantendo os parâmetros default do software.

Criação do ortomosaico georreferenciado (Build Orthomosaic): produzido em qualidade High a partir do MDS, exportado em formato compatível com o SIG (GeoTIFF).Após a obtenção do ortomosaico, o arquivo foi importado para o software QGIS. Nesse ambiente, foi utilizado a calculadora raster do software para o cálculo do índice de vegetação VARI (Visible

ISBN 978-65-990392-6-3

Atmospherically Resistant Index), utilizando as bandas espectrais RGB do ortomosaico, de acordo com a equação:

$$VARI=(G-R)/(G+R-B)$$

onde:
R = banda do vermelho (Red),
G = banda do verde (Green),
B = banda do azul (Blue).

O resultado foi a geração de um raster do índice VARI, permitindo avaliar a variabilidade espacial da vegetação presente na área de estudo.

Figura 4 – VANT DJI Phantom 4 usado para o imageamento.



Fonte: Autores (2025)

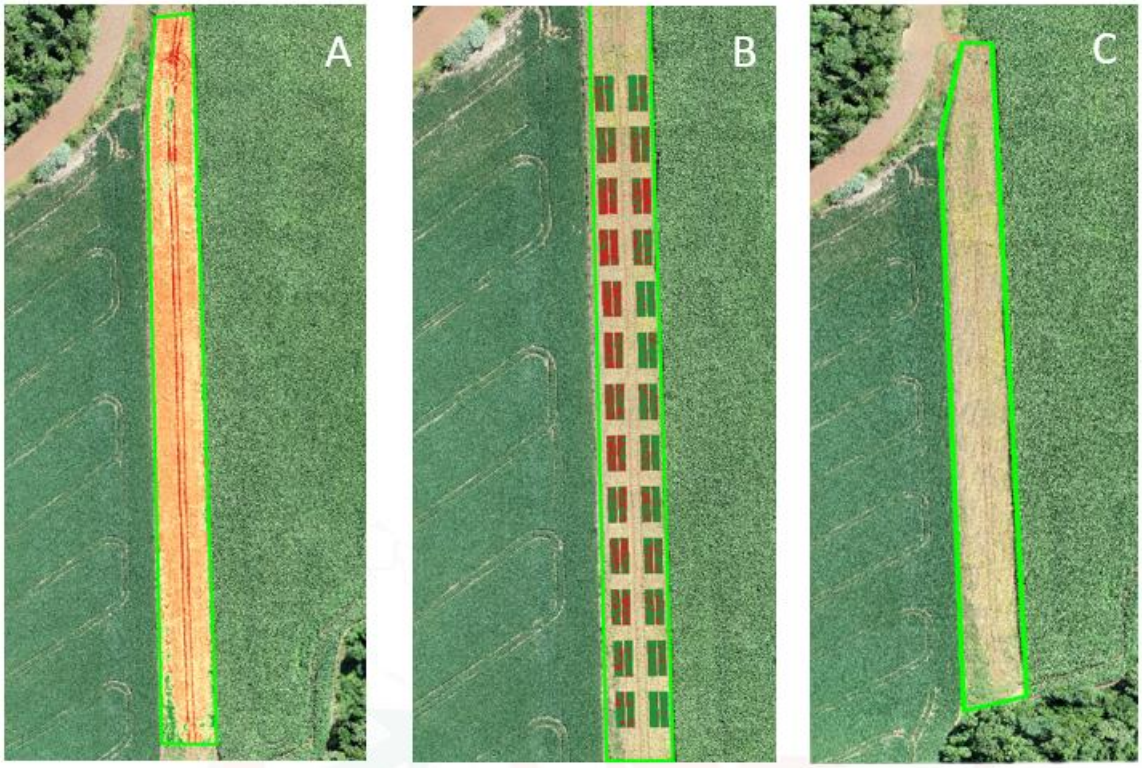
As imagens foram obtidas em condições de luminosidade uniforme, reduzindo interferências de sombra e reflexos no dossel da cultura. Após a coleta, os dados foram processados e ortorretificados por meio das ferramentas do próprio software, possibilitando a geração de mosaicos de alta resolução.

Posteriormente, foram aplicados índices espectrais, com destaque para o VARI, a fim de identificar variações no vigor e sanidade vegetal dos blocos experimentais, servindo de base para as análises estatísticas subsequentes.

Após a geração do índice VARI, os blocos experimentais foram individualizados de acordo com seus respectivos tratamentos. Em seguida, aplicou-se a estatística zonal, possibilitando a obtenção de tabelas com os valores médios e a quantificação da massa foliar. Esses dados serviram de base para a aplicação das fórmulas estatísticas, conforme ilustrado na figura 5.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 5 – Filtro VARI (A), Recorte dos blocos e aplicação da estatística zonal (B), Limite da área experimental usada (C).



Fonte: Autores (2025)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância (ANOVA) para a variável cobertura não revelou diferenças estatisticamente significativas ($p > 0,05$) entre os fatores volume de calda, posição de aplicação e a interação entre eles (Tabela X). O coeficiente de variação (CV) foi de 22,93%, indicando uma variabilidade considerada aceitável para experimentos de campo, mas que pode ter contribuído para a ausência de significância estatística. A média geral observada foi de 0,052 µL cm^{-2}, refletindo baixa variação entre os tratamentos.

Apesar da ausência de significância pelo teste F, observa-se uma tendência de redução da cobertura com o aumento do volume de aplicação: as médias observadas variaram de 0,056 µL cm^{-2} (60 L ha^{-1}) para 0,049 µL cm^{-2} (180 L ha^{-1}). Esse comportamento sugere que volumes menores podem favorecer maior deposição relativa nas folhas, possivelmente devido à menor escorrimento da calda e melhor interceptação pelo dossel. Resultados semelhantes foram relatados por Cunha et al. (2014), que destacam que volumes elevados nem sempre correspondem a melhor cobertura, especialmente em condições de dossel fechado, conforme a tabela 1.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 1: Análise de variância

Variáveis	GL	SQ	QM	FC	Pr>Fc
Volume	3	0,000395	0,000132	0,928	0,4381
Posição	2	0,000225	0,000113	0,794	0,4605
Vol x Pos	6	0,000100	0,000017	0,118	0,9936
Erro	33	0,004682	0,000142	-	-
Total corrigido	47	0,005502			

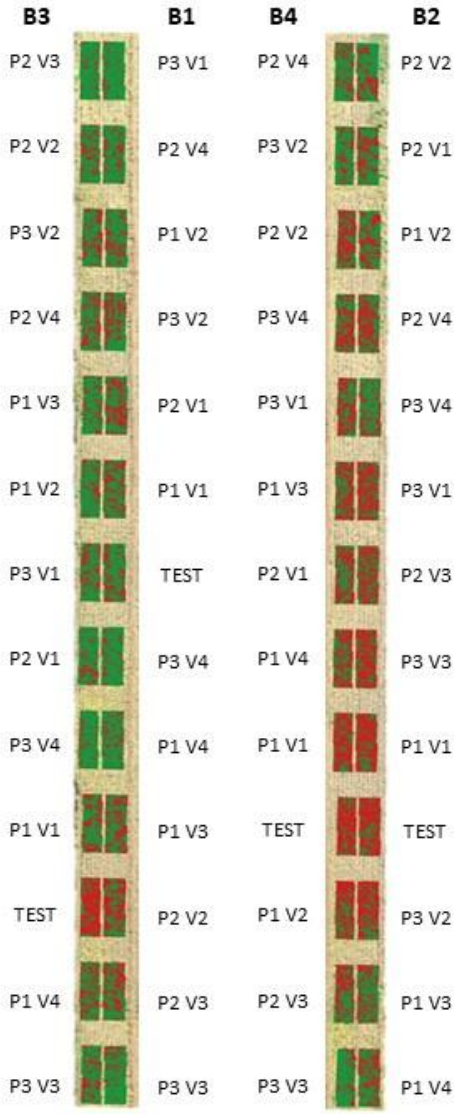
Legenda: **GL** – Grau de Variação, **SQ** – Soma de Quadrados, **QM** – Quadrado Médio, **FC** – Valor de F Calculado, **Pr>Fc** – Probabilidade associada ao teste F, **Rep** – Repetição, **Vol** – Volume, **Pos** – Posição. Tukey à probabilidade de 5%, Coeficiente de Variação com 22.93%.

No fator posição de aplicação, o teste de Tukey não detectou diferenças significativas entre as modalidades (superior, inferior e combinação). Entretanto, as médias indicaram que a aplicação somente no terço superior (C) apresentou valores ligeiramente superiores de cobertura (0,055 µL cm^{-2}), em comparação com a aplicação inferior (B) e combinada (CB). Esses resultados podem estar relacionados à maior interceptação de gotas na parte superior da planta, o que reduz a quantidade que efetivamente atinge o interior do dossel, conforme também discutido por Lidório et al. (2021).

A ausência de efeito estatístico claro pode ser atribuída à alta uniformidade da pulverização nos tratamentos, bem como às condições ambientais estáveis durante as aplicações, que reduziram as diferenças entre as estratégias avaliadas. Contudo, os dados sugerem que a adoção do pingente como mecanismo auxiliar de aplicação pode trazer benefícios pontuais em termos de penetração, ainda que não tenha sido evidenciado de forma significativa neste ensaio. Estudos de Eggers et al. (2020) ressaltam que a eficiência do controle químico depende tanto da cobertura quanto da uniformidade da distribuição, e que ganhos práticos podem não ser capturados apenas pela significância estatística, conforme a figura 6.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 6 – Aplicação do filtro nos blocos para diferenciar solo e vegetação, evidenciando os tratamentos para análise visual.



Legenda: **B1** – Bloco 1, **B2** – Bloco 2, **B3** – Bloco 3, **B4** – Bloco 4, **P1** – Pulverização por cima, **P2** – Pulverização com Pingente, **P3** – Pulverização combina por cima e Pingente, **TEST** – Sem aplicações, **V1** – Volume de 60 L/Ha, **V2** – Volume de 100 L/Ha, **V3** – Volume de 140 L/Ha, **V4** – Volume de 180 L/Ha.
Fonte: Autores (2025)

4 CONCLUSÃO

Em síntese, os resultados indicam que, embora não tenham ocorrido diferenças estatísticas, volumes intermediários de aplicação aliados ao uso de pingentes podem contribuir para maior uniformidade da cobertura no dossel, o que é estratégico para o controle de doenças em soja. A análise visual destaca-se que a pulverização combinada (Pulverização por cima junto com o pingente) possui uma maior massa vegetal. A avaliação por sensoriamento

ISBN 978-65-990392-6-3

remoto (VARI) realizada paralelamente poderá complementar esses achados, fornecendo uma visão mais integrada da eficiência fitossanitária.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Brazil.** ***Meteorologische Zeitschrift***, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

CARON, B. O. et al. Eficiência de conversão da radiação solar fotossinteticamente ativa e distribuição de fitomassa produzida no meloeiro cultivado em estufa plástica na primavera. ***Revista Brasileira de Agrometeorologia***, n. 2, p. 215–219, 2002.

CUNHA, J. P. A. R.; JULIATTI, F. C.; REIS, E. F. dos. Tecnologia de aplicação de fungicida no controle da ferrugem asiática da soja: resultados de oito anos de estudos em Minas Gerais e Goiás. ***Bioscience Journal***, v. 30, n. 4, p. 950–957, 2014.

EGGERS, H. S. et al. Resposta da aplicação de fungicidas no controle da ferrugem asiática na cultura da soja. ***Brazilian Journal of Development***, v. 6, n. 6, p. 38924–38930, 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). ***Sistema brasileiro de classificação de solos***. 4. ed., Brasília, DF: Embrapa, 2018.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. ***Revista Brasileira de Biometria***, v. 37, n. 4, p. 529–535, 2019.

LIDÓRIO, H. F. et al. **Estimativa do impacto das perdas devido ao uso inadequado da tecnologia de aplicação no manejo fitossanitário da cultura da soja**. 2021.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 74

AVALIAÇÃO DE PERMEÂMETROS DE POÇO PARA A AQUISIÇÃO DE DADOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO

Evaluation of borehole permeaemeters for the acquisition of hydraulic conductivity data of saturated soil

Catia Bertollo Chaves[1]; Alejandro David Chuquimia Quicaña[1]; Luísa Ceresoli Chimello[1]; Michael Mazurana[1]; Getulio Coutinho Figueiredo[1]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 7712, 91540-000, Porto Alegre, Brasil, caatiabc@gmail.com, alejandrodquicana@gmail.com, lu.chimello@gmail.com, michael.mazurana@gmail.com, getulio.figueiredo@ufrgs.br

RESUMO

A condutividade hidráulica é um indicador sensível da funcionalidade do solo e a aquisição deste dado costuma ser laboriosa. O objetivo deste estudo foi avaliar métodos de aquisição de dados manuais com o Permeâmetro de Guelph e automatizados com o SoloFlux. O experimento foi conduzido na Estação Experimental Agronômica da UFRGS. A preparação dos poços seguiu procedimentos preconizados na literatura e a ksat foi calculada utilizando a equação de fluxo tridimensional. Os resultados mostraram elevada concordância entre os métodos ($R^2 \approx 0,8$) e ausência de diferença ($p > 0,05$) entres as médias de ksat, independentemente do tipo de permeâmetro ou abordagem de aquisição de dados. O SoloFlux apresentou maior densidade amostral e sensibilidade em solos de baixa ksat, facilitando a aquisição de dados. Ambos os tipos de permeâmetros fornecem resultados equivalentes, sendo o SoloFlux uma alternativa prática e eficiente para medições automatizadas, especialmente em larga escala.

Palavras-chave: Medições Automatizadas. Permeâmetro de Guelph. SoloFlux.

ABSTRACT

Hydraulic conductivity is a sensitive indicator of soil functionality, and acquiring this data is often laborious. The objective of this study was to evaluate manual data acquisition methods using the Guelph Permeameter and automated methods using SoloFlux. The experiment was conducted at the Agronomic Experimental Station of UFRGS. The preparation of the wells followed procedures recommended in the literature, and ksat was calculated using the three-dimensional flow equation. The results showed high agreement between the methods ($R^2 \approx 0.8$) and no difference ($p > 0.05$) between the ksat means, regardless of the type of permeameter or data acquisition approach. SoloFlux presented higher sample density and sensitivity in soils with low ksat, facilitating data acquisition. Both types of permeameters provide equivalent results, with SoloFlux being a practical and efficient alternative for automated measurements, especially on a large scale.

Keywords: Automated Measurements. Guelph permeameter. SoloFlux.

1 INTRODUÇÃO

O solo desempenha diversos serviços essenciais à sociedade, sendo a base para a agricultura. A forma como o solo é manejado exerce função direta sobre suas propriedades físicas, químicas e biológicas. A estrutura de um solo afeta diretamente a dinâmica de água e ar do sistema, desta forma, solos sem estrutura ou muito compactados tem sua dinâmica de

ISBN 978-65-990392-6-3

água, ar e nutrientes alterada, diminuindo a capacidade de armazenamento e disponibilidade de água e nutrientes (HAMZA; ANDERSON, 2005).

As propriedades físicas mais utilizadas para avaliação da qualidade física são: textura, densidade, resistência à penetração, porosidade, retenção e disponibilidade de água, condutividade hidráulica e estabilidade de agregados. Contudo, a capacidade funcional da estrutura do solo não é diretamente descrita pela maioria destes atributos (ARAÚJO et. al., 2012). Neste sentido, a condutividade hidráulica do solo saturado (ksat) é um dos parâmetros físicos mais sensíveis para a avaliação da qualidade do solo, pois reflete diretamente a funcionalidade da sua estrutura, especialmente quanto à macroporosidade e continuidade dos poros (BEVINGTON et al., 2016).

Além disso, a ksat é sensível ao manejo, podendo apresentar redução significativa em solos compactados, mesmo quando outros atributos físicos não indicam diferenças significativas (BOUMA, 1989). A principal diferença entre a condutividade hidráulica do solo saturado e do não saturado está no volume de poros preenchidos por água: nos solos saturados, todos os poros estão preenchidos, enquanto nos solos não saturados apenas parte deles contém água. Além disso, o fluxo em solos saturados ocorre predominantemente de forma horizontal, enquanto o não saturado ocorre preferencialmente no sentido vertical (RADCLIFFE; RASMUSSEN, 2000).

Existem equipamentos para a determinação da ksat, como o permeâmetro de Guelph, utilizado desde a década de 1980 para diferentes aplicações, dentre elas, relacionadas à geotecnia, dimensionamento de projetos de irrigação e drenagem. Por ser um permeâmetro de poço, apresenta algumas vantagens em relação a métodos laboratoriais, como o uso de discos *in situ*, pois considera o volume, a tortuosidade e a interconexão do sistema poroso, sendo amplamente utilizado por causar pouco distúrbio, ser de fácil manuseio e por combinar o movimento vertical e horizontal da água no solo, representando de forma tridimensional a condutividade hidráulica do solo saturado (RAGAB; COOPER, 1990).

Apesar disso, a aquisição de dados é bastante laboriosa, pois necessita de um operador treinado tomando nota ao longo do tempo. Diante disso, Cernicchiaro, Barmak e Teixeira (2019) propuseram a instrumentação de um permeâmetro Guelph, visando a eliminação da necessidade do acompanhamento das medições de variação de carga hidráulica, já que esta informação é adquirida via sensor de pressão e armazenada em um *datalogger*. Visando a difusão da instrumentação eletrônica de permeâmetros, os autores (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas e Embrapa Solos) firmaram parceria com a empresa Falker Automação Agrícola Ltda. para a produção deste equipamento em larga escala, sendo propostas melhorias do equipamento para potencializar sua operacionalidade no campo.

O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de permeâmetros de poço considerando dados da variação de carga hidráulica aquisitados de forma manual (equipamentos tipo Guelph e o SoloFlux) e automatizada (SoloFlux). A hipótese é que a estratégia de aquisição de dados não influencia a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O experimento foi conduzido na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA - UFRGS) na região metropolitana de Porto Alegre no estado do Rio Grande do Sul, na região fisiográfica Depressão Central (30°05'24.2"S 51°38'55.6"W). A região apresenta clima do tipo Cfa (subtropical), de acordo com a

ISBN 978-65-990392-6-3

classificação de Köppen e Geiger, com pluviosidade média anual de 1580 mm e temperatura média anual de 19,8º C e o tipo solo desta área é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico de textura franco-argilo-siltosa.

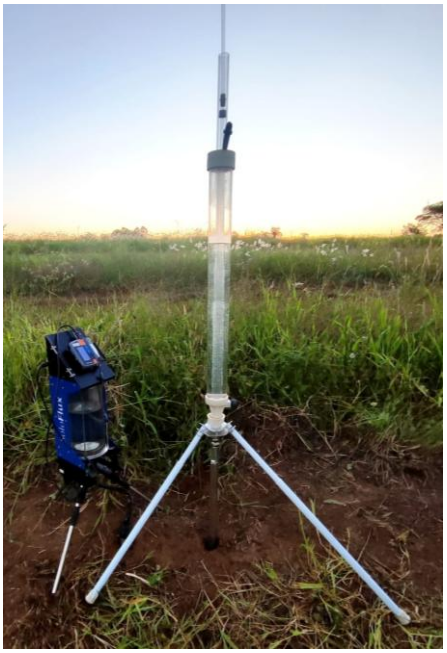
O experimento de longa duração foi implantado no ano de 2000, visando a avaliação de diferentes formas de preparo de solo, com foco na implantação de sistema plantio direto, sendo eles: PD (plantio direto sem preparo) e EG (escarificação e posterior gradagem), onde o solo a cada dois anos era submetido à aração + gradagem leve. Antes da implantação dos experimentos, o solo estava sob campo nativo. Esse manejo foi mantido até 2020, poreteriormente, o solo permaneceu em pousio, incluindo durante as medições com os permeâmetros de poço, ocorrendo dessecação em certos períodos para suprimir o avanço do crescimento de plantas espontâneas.

2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados

A aquisição de dados de fluxo foi realizada de forma pareada em nove pontos amostrais. Foram abertos dois poços de medição com auxílio de um trado holandês. Em seguida, substituiu-se a ponteira por um trado tipo caneca, que foi rotacionado por quatro vezes no sentido anti-horário, para nivelamento das paredes e fundo do poço.

Na etapa de preparo do poço, realizou-se a limpeza interna da parede com auxílio de uma escova, efetuando-se seis inserções controladas. Durante esse procedimento, a escova foi mantida em posição central e perpendicular ao fundo, com o objetivo de eliminar selamentos superficiais e obstruções formadas durante a escavação, que poderiam comprometer o fluxo de água. Todo o processo foi conduzido de forma a manter o poço com 6 cm de diâmetro e 20 cm de profundidade. Adicionalmente, os poços destinados aos diferentes tipos de permeâmetros foram dispostos paralelamente conforme a Figura 1, seguindo o traçado lógico aplicado ao cultivo de acordo com o relevo local, de modo a garantir que ambos estivessem submetidos à mesma história de condições de manejo da área experimental ao longo dos anos em que o solo não esteve em pousio até a coleta de dados deste trabalho.

Figura 1 - Disposição pareada dos permeâmetros em campo

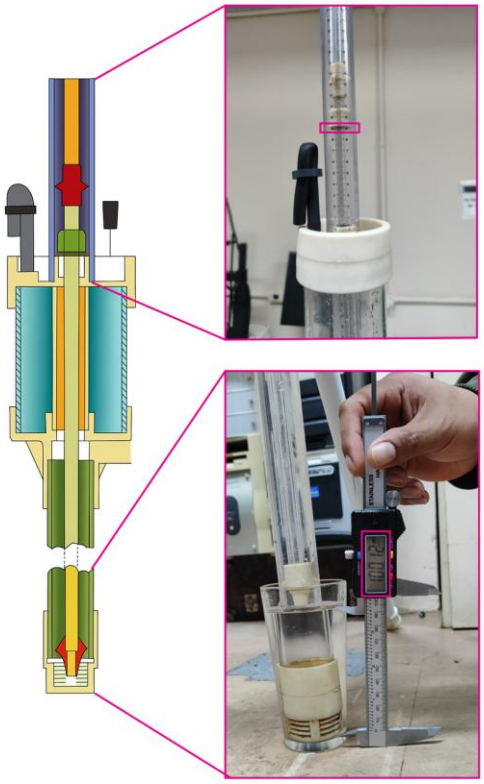


Permeâmetro de Guelph e SoloFlux, respectivamente.
Fonte: Autores (2024).

ISBN 978-65-990392-6-3

Com os poços preparados, procedeu-se ao enchimento de água até a obtenção de uma carga hidráulica de 10 cm. No caso do SoloFlux, esse controle foi realizado por meio da configuração do *datalogger*, que ajustou de forma automatizada a altura da lâmina de água. Já no Permeâmetro de Guelph, utilizou-se o princípio de Mariotte, regulando-se a cânula superior para a altura de 9,2 cm como demonstra a Figura 2. Essa decisão foi fundamentada em ensaios preliminares conduzidos em laboratório, os quais demonstraram que, ao posicionar a cânula diretamente a 10 cm, a carga hidráulica efetiva no interior do poço atingia 11 cm, superestimando a pressão da coluna d'água. Dessa forma, definiu-se a altura de 9,2 cm como a condição mais adequada para manter a carga hidráulica próxima a 10 cm, assegurando maior precisão na comparação da condutividade hidráulica saturada do solo entre os dois métodos.

Figura 2 - Testes de carga hidráulica em laboratório



Adaptado de Geological Survey of Canada, 2012.

O critério de interrupção das medições foi estabelecido com base em dois parâmetros principais: o tempo máximo de duração e a estabilização do fluxo de água no interior dos poços. Assim, as leituras foram conduzidas por período de até uma hora, a menos que, antes disso, fosse observada estabilização das variações de fluxo hídrico ao longo do tempo, condição considerada indicativa de que se havia atingido a saturação do solo. Essa abordagem permitiu garantir tanto a representatividade dos dados coletados quanto a eficiência do processo experimental, evitando medições demasiadamente prolongadas.

Para o cálculo da condutividade hidráulica do solo saturado, adotou-se a equação 1, proposta por Reynolds e Elrick (1985, 1986), amplamente empregada em experimentos de campo que utilizam permeâmetros de poço com o método de carga constante.

ISBN 978-65-990392-6-3

$$Ksat = \frac{cQ}{(2\pi H^2 + \pi a^2 C + 2\pi H/\alpha)} \quad (1)$$

Onde: α valor dependente da macroporosidade; H = altura constante no poço de medição; Q = vazão quando o regime permanente é atingido; C = para quatro classes de solos (textura e macroporosidade).

Tabela 1 - Tipo de estrutura do solo e fatores de forma.

Categoria de textura e estrutura do solo	α (cm^{-1})	Fator de Forma
1 - Tipo 1 Solos compactados, desestruturados, argilosos ou siltosos. Ex.: sedimentos lacustres ou marinhos, etc.	0,01	$C_1 = \left(\frac{\frac{h_1}{\alpha}}{2{,}081 + 0{,}121\left(\frac{h_1}{\alpha}\right)}\right)^{0{,}672}$
Tipo 2 Solos de textura fina (argilosos ou siltosos) e desestruturados. Pode incluir areias finas.	0,04	$C_1 = \left(\frac{\frac{h_1}{\alpha}}{1{,}992 + 0{,}091\left(\frac{h_1}{\alpha}\right)}\right)^{0{,}683}$
Tipo 3 Abrange a maioria dos solos argilosos estruturados. Solos de areia fina e média desestruturados. Categoria mais utilizada para solos agricultáveis.	0,12	$C_1 = \left(\frac{\frac{h_1}{\alpha}}{2{,}074 + 0{,}093\left(\frac{h_1}{\alpha}\right)}\right)^{0{,}754}$
Tipo 4 Solos de areia grossa, pode incluir alguns solos altamente estruturados com elevada macroporosidade.	0,36	$C_1 = \left(\frac{\frac{h_1}{\alpha}}{2{,}074 + 0{,}093\left(\frac{h_1}{\alpha}\right)}\right)^{0{,}754}$

A aproximação entre as abordagens de medição (automatizada e manual) com o SoloFlux foi avaliada por meio de gráfico de dispersão. Adicionalmente, foi aplicado o teste t pareado (p=0,05) para comparar os valores de ksat determinados com os permeâmetros de Guelph e SoloFlux.

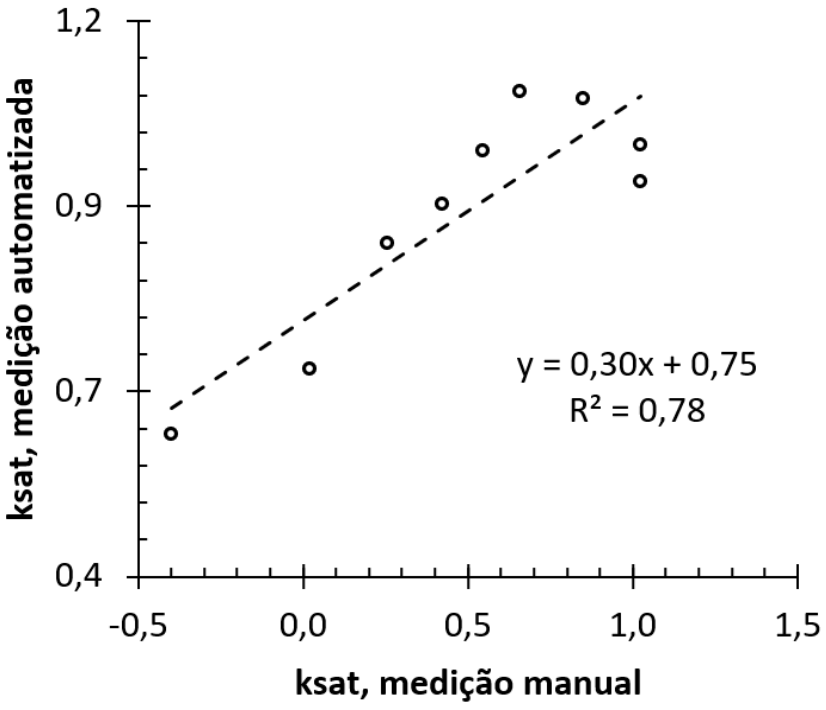
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As determinações de ksat realizadas com o SoloFlux revelaram elevada similaridade entre as abordagens de medição manual e automatizada (Figura 3). Apresentando concordância satisfatória, com coeficiente de determinação (R^2) próximo de 80%. Os desvios observados entre os valores de ksat podem ser atribuídos, em grande parte, às dificuldades inerentes à aquisição manual dos dados, sobretudo em situações em que a condutividade hidráulica apresenta valores reduzidos. Nessas condições, a limitação da detecção visual da variação da carga hidráulica compromete a precisão, uma vez que as alterações no nível de água tornam-se sutis e de difícil identificação a olho nu.

ISBN 978-65-990392-6-3

Outro fator relevante refere-se à densidade amostral dos dados gerados. O SoloFlux obteve uma frequência de aquisição 72 vezes maior que a abordagem manual, registrando uma medição de carga hidráulica a cada 10 s, enquanto a abordagem manual possibilitou apenas uma informação a cada dois minutos. Esta maior densidade amostral de registros garantiu detalhamento mais acurado da variação da carga hidráulica ao longo do tempo, favorecendo análises mais robustas e reduzindo as incertezas associada ao processo de medição, já que pelas alterações estruturais do SoloFlux em relação ao Permeâmetro de Guelph visando atender às demandas logísticas e operacionais, o SoloFlux possui um reservatório mais largo (162,86 cm²) que o permeâmetro de Guelph (35,22 cm²). Desta maneira, para percepção da variação de 1 mm a olho nu, deve-se ter a variação de um volume 4,62 vezes maior em relação ao Permeâmetro de Guelph. Os sensores eletrônicos do SoloFlux possuem uma variância característica que é corrigida em filtragem no algoritmo do software embarcado, não refletindo em alterações de fluxo nas medições, permitindo identificar pequenas variações do fluxo de água que seriam mais dificilmente detectadas por observação visual.

Figura 3 - Comparação dos valores de condutividade hidráulica do solo saturado (ksat) a partir de medições realizadas com o SoloFlux de maneira manual e automatizada. Dados obtidos entre abril e agosto de 2025, num Argissolo Vermelho Distrófico, com histórico de plantio direto até a década de 2020, Eldorado do Sul - RS.



Fonte: Autores (2025).

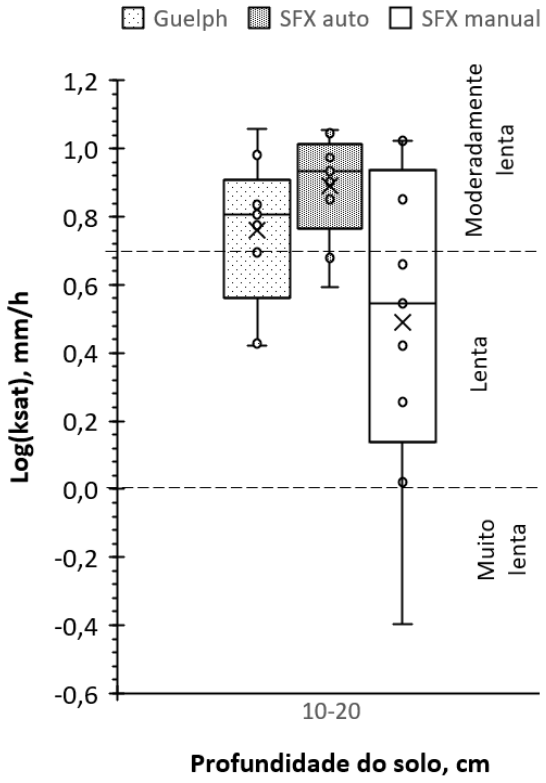
No que diz respeito às medições com o permeâmetro de Guelph, os resultados demonstram que não houve diferença significativa ($p > 0,05$) entre as médias de ksat obtidas com esse equipamento e aquelas registradas pelo SoloFlux, seja pela via manual ou automatizada. A Figura 4 ilustra que a condutividade hidráulica saturada foi classificada, predominantemente, como moderadamente lenta (5 a 20 mm/h) ou lenta (1 a 5 mm/h), independentemente do tipo de permeâmetro conforme a classificação dos dados naturais de ksat de Reichardt, 1978. Resultados semelhantes foram relatados por Silva et al. (2005) para

ISBN 978-65-990392-6-3

uma área experimental próxima, onde valores de Ksat da mesma ordem de grandeza foram encontrados para profundidades equivalentes (12,5 a 17,5 cm), enquadrando a condutividade hidráulica também entre as classes moderadamente lenta e lenta.

Importante salientar que a aquisição de dados dos diferentes permeâmetros foi realizada utilizando poços distintos. Nesse contexto, Chapuis (2012) destaca que a maioria dos solos naturalmente apresenta variabilidade espacial da condutividade hidráulica classificada como alta a muito alta, fator que explica parte da dispersão dos dados. Lier (2010), pela Lei de Poiseuille, evidencia que o fluxo de água (Q) é proporcional ao quadrado do raio dos poros. Assim, mesmo uma pequena variação no diâmetro dos poros do solo nos poços de ensaio pode provocar diferenças de ordem quadrática no fluxo, gerando variações significativas nos valores de ksat. Contudo, os resultados do presente trabalho mostraram que os valores de ksat não apresentaram diferenças ($p>0,05$) entre as estratégias avaliadas, e o SoloFlux apresentou desempenho melhor quanto à operacionalidade e otimização dos trabalhos de campo.

Figura 4 - Distribuição dos valores da condutividade hidráulica do solo saturado, ksat, num Argissolo Vermelho Distrófico, com histórico de plantio direto até a década de 2020, Eldorado do Sul - RS.



Classificação dos valores naturais de ksat: moderada (20 ≤ 60 mm/h); moderadamente rápida (60 ≤ 120 mm/h); rápida (120 ≤ 180 mm/h) e muito rápida (> 180 mm/h).
Fonte: Autores (2025)

4 CONCLUSÃO

Ambas as abordagens utilizadas para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado, por meio dos permeâmetros de Guelph e do SoloFlux, apresentaram resultados equivalentes, independentemente de a variação da carga hidráulica ter sido obtida de forma automatizada ou manual. A semelhança entre os valores de ksat obtidos evidencia que, apesar

ISBN 978-65-990392-6-3

das diferenças estruturais e de arranjo poroso entre os poços de medição, os pontos amostrais apresentaram comportamento consistente e concordante entre si.

Ainda que os dois equipamentos tenham fornecido classificações semelhantes para os valores de ksat, observou-se uma vantagem operacional no uso do permeâmetro SoloFlux. Este equipamento demonstrou maior praticidade na aquisição de dados, especialmente em solos com condutividade hidráulica baixa, onde a variação da carga hidráulica nem sempre é de fácil identificação visual. Assim, embora ambas as abordagens se mostram confiáveis e tecnicamente adequadas, o SoloFlux apresenta maior eficiência operacional, reduzindo a subjetividade das leituras e favorecendo sua aplicação em condições de campo mais desafiadoras.

AGRADECIMENTOS

À empresa Falker Automação Agrícola Ltda pelo cedimento do equipamento SoloFlux e ao Instituto Riograndense do Arroz pelo empréstimo do Permeâmetro de Guelph e a todos os colaboradores.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Edson Alves de; KER, João Carlos; LANI, João Luiz; NEVES, Júlio César Lima. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, p. 12-22, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/270106254_Qualidade_do_solo_conceitos_indicadores_e_avaliacao. Acesso em: 28 ago. 2025.

BEVINGTON, W. et al. **Assessing soil physical quality using field-saturated hydraulic conductivity**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2016. Disponível em: https://cti.ufpel.edu.br/siepe/arquivos/2021/CA_02148.pdf. Acesso em: 29 ago. 2025.

BOUMA, J. Soil morphology and hydraulic conductivity: sensitivity to management. **Soil Science**, v. 148, n. 4, p. 279–287, 1989. Disponível em: https://doi.org/10.1097/00010694-198910000-00004. Acesso em: 25 ago. 2025.

CERNICCHIARO, G.; BARMAK, R.; TEIXEIRA, W. G. Digital interface device for field soil hydraulic conductivity measurement. **Journal of Hydrology**, v. 576, p. 58–64, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.034. Acesso em: 24 ago. 2025.

CHAPUIS, R. P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [s. l.], v. 71, p. 401-434, 2012. DOI: 10.1007/s10064-012-0418-7. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-012-0418-7. Acesso em: 25 ago. 2025.

GEOLOGICAL SURVEY OF CANADA. **2800 Operating Instructions: Guelph Permeameter**. Guelph: Soilmoisture Equipment Corp., dez. 2012.

ISBN 978-65-990392-6-3

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009.

LIER, Q. de J. van. **Física baseada em processos**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 312 p.

RADCLIFFE, D. E.; RASMUSSEN, T. C. Soil water movement. In: WARRICK, A. W. (ed.). **Soil Physics Companion**. Boca Raton: CRC Press, 2001. p. 85–126.

RAGAB, R.; COOPER, J. D. Variability of unsaturated zone water transport parameters: Implications for hydrological modelling. 1. In situ measurements. **Journal of Hydrology**, v. 148, p. 109–131, 1990. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169493902558. Acesso em: 28 ago. 2025.

REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. São Paulo: McGraw-Hill, 1978. p. 120.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α-parameter using the Guelph Permeameter. **Soil Science**, v. 140, n. 4, p. 292–302, 1985. Disponível em: https://doi.org/10.1097/00010694-198510000-00008. Acesso em: 30 ago. 2025.

SILVA, Mellissa Ananias Soler da et al. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 547–554, jun. 2005. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cr/a/TnVFHfSrK94rmgpQ3yyWNcL/. Acesso em: 2 set. 2025.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 75

AVALIAÇÃO DAS PERDAS DE GRÃOS NA COLHEITA DA CULTURA DA SOJA

Assessment of grain losses in soybean crop harvest

Dienifer Wieirich Lopes[1]; Rodrigo Marcuzzo Motta[2]; João Gabriel Fortes Peixoto[1]; Érika Nunes Macedo[1]; Lorenzo Isasmendi da Silveira[1]; Taís Gonçalves Pinto[1] Eduardo Leonel Bottega[3]; Alberto Eduardo Knies[4]

[1] Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs), Rua Sete de Setembro, nº. 1040, Centro, CEP 96508-010, Cachoeira do Sul - RS, Brasil, e-mail para contato <dienifer-lopes@uergs.edu.br>;

[2] Eng. Agrônomo, egresso da Uergs Unidade em Cachoeira do Sul - RS, <rodrigo-motta@uergs.edu.br>.

[3] Eng. Agr., Me. e Dr. em Eng. Agrícola, prof. Adjunto da UFSM Campus Cachoeira do Sul - RS, eduardo.bottega@ufsm.br

[4] Eng. Agr., Me. em Ciência do Solo, Dr. em Eng. Agrícola, prof. Adjunto da Uergs Unidade em Cachoeira do Sul - RS, alberto-knies@uergs.edu.br.

RESUMO

A colheita da cultura da soja é uma etapa importante no ciclo produtivo, podendo apresentar perdas significativas se não for realizada adequadamente. Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar por diferentes métodos as perdas de grãos na colheita da cultura da soja e, após realizar ajustes nas colhedoras e verificar o efeito na perda de grãos. Foram avaliadas as perdas de grãos em três propriedades agrícolas em Cachoeira do Sul – RS, utilizando três métodos: pesagem, copo medidor e contagem de grãos. Os resultados mostraram que a maioria das perdas ocorre na plataforma de corte, sendo influenciada pela regulagem da máquina e pelas condições da planta no momento da colheita. Ajustes técnicos nas regulagens das colhedoras, como redução da velocidade do molinete e melhor acompanhamento do solo, reduziram em média 36,25% as perdas de grãos. Conclui-se que o monitoramento contínuo, aliado à capacitação de operadores e regulagens precisas das colhedoras, são essenciais para minimizar perdas na colheita e contribuir para a busca da sustentabilidade na produção da cultura da soja.

Palavras-chave: Mecanização agrícola. Colhedoras de grãos. Eficiência agrícola.

ABSTRACT

Soybean harvesting is an important stage in the production cycle and can result in significant losses if not carried out properly. Therefore, this study aims to evaluate grain losses during soybean harvesting using different methods and, after adjusting the harvesters, verify the effect on grain losses. Grain losses were evaluated on three farms in Cachoeira do Sul, RS, using three methods: weighing, measuring cups, and grain counting. The results showed that most losses occur at the cutting platform and are influenced by machine settings and plant conditions at harvest. Technical adjustments to harvester settings, such as reducing reel speed and improving soil tracking, reduced grain losses by an average of 36.25%. The conclusion is that continuous monitoring, combined with operator training and precise harvester settings, are essential to minimize harvest losses and contribute to the pursuit of sustainable soybean production.

Keywords: Agricultural mechanization. Grain harvesters. Agricultural efficiency.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

Em nível mundial, o Brasil é o maior produtor de soja, ocupando uma área de 81 milhões de hectares, totalizando uma produção de 165,2 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2025). O Estado do Rio Grande do Sul, é o terceiro maior produtor brasileiro de soja, com uma área plantada de aproximadamente 5,9 milhões de hectares, obtendo uma produção de 11,2 milhões de toneladas. As cidades gaúchas de Tupanciretã, e Palmeira das Missões, se destacam por produzirem, em média, mais de 300 mil toneladas anuais (ATLAS SÓCIO ECONÔMICO, 2022).

À medida em que as plantas de soja se aproximam da maturação normal, estádio R8, as folhas tornam-se amarelas e caem, as vagens secam apresentando coloração marrom ou cinza e as sementes perdem umidade rapidamente (AGEITEC, 2022). A colheita da cultura deve ser realizada em um teor de umidade entre 13 e 18%, pois desta forma, evita-se perdas na qualidade do produto e diminui-se o dano mecânico no grão pois, uma vez que é atingida a maturação de colheita, a tendência é a deterioração dos grãos e a debulha, em intensidade proporcional ao tempo em que a soja permanecer no campo (MARTIN et al., 2024).

Máquinas utilizadas para realização da colheita da soja são designadas colhedoras. A designação “colhedora combinada automotriz” nomeia na terminologia técnica máquinas que cortam, recolhem, trilham e limpam o produto, em uma só passada no campo, e que são providas de motor e transmissão que lhes conferem autopropulsão (HEIFFIG; CÂMARA, 2006).

A colhedora apresenta em sua constituição órgãos auxiliares e órgãos fundamentais. Os órgãos auxiliares constam basicamente de um motor de combustão interna, sistema de transmissão para deslocamento, tanque de combustível e uma cabine com posto de operador, com os comandos da máquina. Os órgãos fundamentais compõem a unidade de colheita, dividida em sistema de corte e alimentação, trilha, separação e limpeza (COTRISOJA, 2017).

O sistema de trilha na colhedora de grãos é o mais importante e que define resultados tanto positivos, quanto negativos no processamento do material e do fluxo do mesmo no interior da colhedora. A trilha é responsável por receber a planta cortada, trilhar e separar o grão da palha, e define o caminho e o destino final desse material. É fundamental que na trilha ocorram condições de que, no mínimo 90% dos grãos trilhados e no máximo 10% de palha, tenham acesso ao sistema de limpeza através do côncavo (REVISTA CULTIVAR, 2016).

Existem basicamente dois tipos de trilha: a de fluxo radial e a de fluxo axial. A colhedora com trilha radial possui cilindro e côncavo transversal e a trilha acontece através do acesso da planta cortada pela esteira, passando entre o cilindro e o côncavo onde acontece a trilha. Grande parte dos grãos separados na trilha passa pelo côncavo em direção ao sistema de limpeza e a palha graúda é conduzida para o saca-palhas, passando pelo batedor traseiro (segundo cilindro), recebendo impacto contra o pente do côncavo complementando a trilha e contribuindo na separação. O sistema radial possui a característica de mudar a trajetória do material pela rotação do cilindro, o que causa a demora na saída dos grãos do sistema, acarretando em dano mecânico ao mesmo, bem como o retardamento do fluxo da palha, o que sobrecarrega o sistema de separação e limpeza (REVISTA CULTIVAR, 2016).

A colhedora de fluxo axial é aquela em que o sistema é composto por rotor e côncavo longitudinal em relação à máquina. Esse sistema tem por característica o menor tempo de permanência do material na trilha, reduzindo danos mecânicos (quebra de grãos), na qual o material se desloca paralelo ao eixo do rotor, com maior tempo de separação do grão da palha, reduzindo perdas. Neste sistema, a trilha e a separação acontecem por um único sistema, com

ISBN 978-65-990392-6-3

o objetivo de melhorar a qualidade do grão e a redução de perdas (REVISTA CULTIVAR, 2016).

Durante o processo de colheita, é normal o acontecimento de algumas perdas de grãos. Porém, é necessário conhecer suas causas para que esta seja reduzida ao mínimo, de forma que o lucro do produtor seja maior. As perdas na colheita são influenciadas por fatores inerentes à cultura com a qual se trabalha e/ou fatores relacionados com a colhedora (HEIFFIG; CÂMARA, 2006).

Embora as perdas sejam diversas e ocorram tanto antes quanto durante a colheita, a má regulagem e operação da colhedora, na maioria das vezes, são causadas pelo pouco conhecimento do operador. O trabalho perfeito entre o molinete, a barra de corte, o caracol, a velocidade da operação, e as regulagens do sistema de trilha e de limpeza são fundamentais para que a colheita seja eficiente (AGROLINK, 2022).

Perdas causadas pela plataforma de corte (barra de corte, molinete e caracol) são responsáveis por, em média, 80% a 85% das perdas, oriundas de mecanismos externos da plataforma de corte das colhedoras e sua conservação, incluindo as perdas por debulha, por altura de inserção e por acamamento de plantas que ocorrem na frente da plataforma de corte (BEZERRA, 2012). Facas cegas e dedos das contra navalhas frouxos diminuem a ação de corte e aumentam a vibração das plantas, promovendo abertura de vagens e queda de grãos fora da plataforma, assim como, o molinete muito avançado e com rotação excessiva provoca um aumento na debulha (HEIFFIG; CÂMARA 2006).

Perdas por trilha, separação e limpeza significam, em média, 12% das perdas e são ocasionadas pelos mecanismos internos das colhedoras (trilha, separação e limpeza) (BEZERRA, 2012). Em condições de elevada umidade dos grãos (acima de 20%) as perdas durante a trilha podem ser altas, uma vez que os grãos não são separados das vagens, retornando ao campo. A má regulagem das peneiras e do ventilador também podem provocar perdas de grãos que são eliminados juntamente com a palha (HEIFFIG; CÂMARA, 2006). A determinação das perdas de grãos ajuda no monitoramento do processo de colheita, de modo que possam ocorrer ajustes de regulagem na colhedora, evitando as perdas na produção (SILVEIRA; CONTE, 2013) e, assim, contribuindo com o aumento da produtividade e sustentabilidade da propriedade.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar, por diferentes métodos, as perdas de grãos na colheita da cultura da soja e, após realizar ajustes nas colhedoras, verificar o efeito na perda de grãos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado em três propriedades agrícolas localizadas no interior do município de Cachoeira do Sul - RS, nas localidades de Cordilheira, Capané e Irapuá, onde foi acompanhada a colheita da cultura da soja com quatro modelos de colhedoras, conforme tabela 1.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 1. Descrição das colhedoras utilizadas nas avaliações das perdas de grãos na colheita da cultura da soja.

Propriedade	Marca/modelo da colhedora	Plataforma (pés)	Trilha	Separação	Área (ha)
1	New Holland 4040	13	Radial	Saca-palhas	23
2	New Holland TC 5090	25	Radial	Rotor duplo	60
2	New Holland TC 5090	25	Radial	Saca-palhas	60
3	John Deere 1450	16	Radial	Saca-palhas	35

Fonte: Autores (2025).

As colhedoras apresentavam bom estado de conservação e manutenção, bem como todas usavam plataformas de corte com rosca sem-fim/caracol, conforme pode-se observar na figura 1.

Figura 1. Colhedoras utilizadas na colheita da cultura da soja e nas avaliações de perdas de grãos, sendo (a) NH 4040, (b) NH TC 5090 e (c) JD 1450.



Legenda: NH: New Holland, JD: John Deere. Fonte: Autores (2025).

Foram realizadas avaliações das perdas de grãos em quatro talhões, conforme descrito no quadro 1, utilizando-se três métodos de avaliações a partir da coleta dos grãos em uma área conhecida (2 m^2), sendo: 1. pesagem dos grãos (método padrão); 2. estimativa com auxílio de um copo medidor graduado e, 3. contagem de número de grãos perdidos que posteriormente é convertido (estimado) para sacas por ha.

O primeiro método, consiste na demarcação de uma área conhecida, normalmente 2 m^2, de onde são coletados os grãos e vagens perdidas nesta área, que devem então ser limpos e pesados em uma balança de precisão e, posteriormente, extrapolado a perda para 1 ha (10.000 m^2). Realizado a análise da umidade dos grãos, para posteriormente fazer a correção do peso para umidade padrão de armazenamento (14%). É considerado o método padrão e

ISBN 978-65-990392-6-3

mais preciso, mas por envolver pesagem e medição da umidade, este método envolve equipamentos específicos, muitas vezes não disponíveis aos produtores.

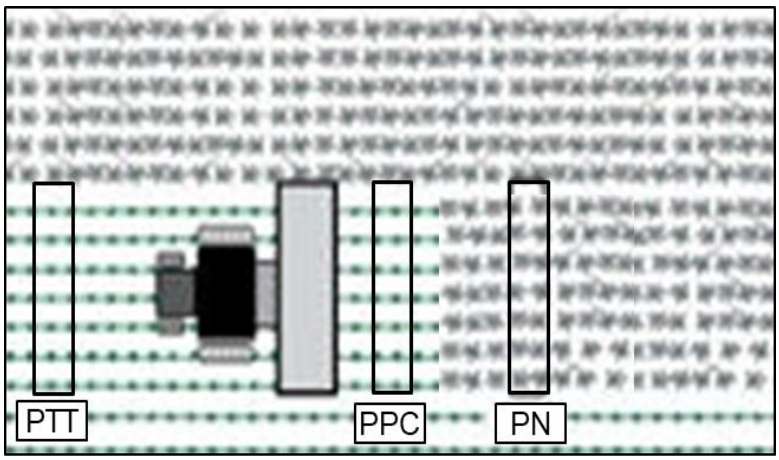
O segundo método utilizado para avaliação das perdas de grãos foi desenvolvido em 1982 por Mesquita e Gaudêncio (MESQUITA et al., 2001)., sendo um método volumétrico que estima as perdas na colheita de soja por meio da correlação entre o peso e o volume dos grãos. Com uma confiabilidade de 94%, este método consiste, basicamente, de duas operações, a coleta dos grãos e vagens (que precisam ser debulhadas) em uma área delimitada de 2,0 m^2, sua deposição em um copo plástico graduado e a leitura direta desses em uma escala de perda (em sacos de 60 kg por hectare) (SILVEIRA; CONTE, 2013).

O copo medidor volumétrico é caracterizado por um recipiente cilíndrico, feito de plástico, não deformável, transparente, que não altera o volume e permite a visualização do nível dos grãos no seu interior. Possui uma escala de 0 a 11 sacos de 60 Kg ha^{-1} impressa diretamente no copo, o que possibilita quantificar os grãos coletados (na área pré-estabelecida de 2,0 m²) (SILVEIRA; CONTE, 2013).

Outro método para avaliação das perdas de grãos, consiste em recolher os grãos em uma área conhecida (2 m^2, por exemplo) e realizar a sua contagem. Posteriormente, o número de grãos perdidos é convertido para sacas por hectare, considerando 40 grãos/m^2 equivalente a perda de 1,0 sc/ha (BOLLER; BORGES, 2017; SILVA, 2025).

As amostragens foram coletadas em três locais (repetições) em cada talhão e, em cada local foram realizadas três amostragens, conforme figura 2.

Figura 2. Ilustração dos pontos de coleta das amostras de perdas de grãos.



Legenda: PN: perdas naturais; PPC: perdas da plataforma de corte e naturais; PTT: perdas de trilha e totais.

Fonte: adaptado de Mesquita et al. (1998).

No momento das avaliações, a cultura da soja encontrava-se no estágio R8, ou seja, no ponto ideal para colheita, quando a cultura apresenta maturação normal, folhas caídas, vagens secas com coloração marrom ou cinza e as sementes com umidade adequada.

ISBN 978-65-990392-6-3

A coleta das amostras nos três métodos foi realizada em uma área retangular de 2 m^2, sendo o comprimento correspondente a largura da plataforma de corte das colhedoras e a largura ajustada para corresponder a respectiva área (2 m^2). Com a demarcação da área, foi realizado a coleta dos grãos em PN (perdas naturais), PPC (perdas da plataforma de corte e naturais e PPT (perda de trilha e totais).

Esta área foi demarcada com auxílio de barbantes e cano de PVC (figura 3) para melhorar a identificação do local de coleta e agilizar o processo.

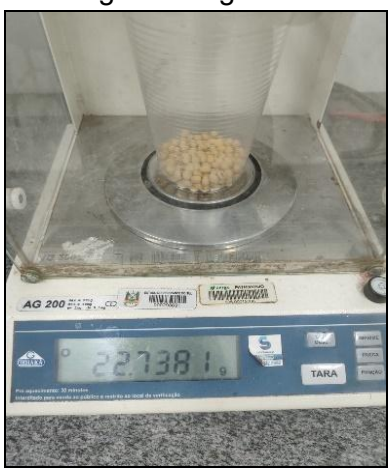
Figura 3. Demarcação da área retangular de 2 m^2 para coleta das amostras dos grãos perdidos (ao fundo) e copo medidor graduado para avaliação das perdas de grãos.



Fonte: Autores (2025).

As amostras de grãos coletadas no campo foram acondicionadas em embalagens de papel e levadas do laboratório da Uergs, onde foram pesadas em balança de precisão (figura 4), realizada a contagem dos grãos (figura 5a) e medida a umidade (figura 5b).

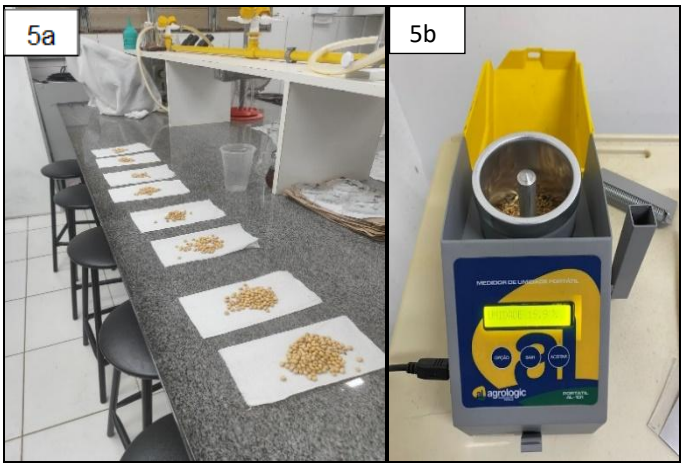
Figura 4. Pesagem dos grãos das amostras.



Fonte: Autores (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 5. Contagem (5a) e medição de umidade (5b) dos grãos das amostras.



Fonte: Autores (2025).

Cabe destacar, que ao iniciar a colheita de cada talhão foi acompanhado e orientado o operador da colhedora, com relação à velocidade de colheita, sentido de deslocamento e manobras e, realizados breves ajustes nas regulagens da plataforma de corte e do sistema de trilha e limpeza.

Ao realizar a coleta dos grãos perdidos na área demarcada, também foi observada a forma em que os grãos se encontravam no chão (inteiros, quebrados, vagem inteira, planta não colhida), de forma a identificar possíveis problemas e auxiliar nos ajustes nas regulagens da colhedora. Também, foi analisado o interior do tanque graneleiro das colhedoras, sendo observada a integridade dos grãos e a presença de impurezas, para analisar a necessidade de possíveis ajustes nas regulagens.

Os dados coletados foram analisados com auxílio do *software* Sisvar versão 5.1, sendo submetidos à análise de variância e, os efeitos estatisticamente significativos pelo teste F foram discriminados pelo teste de Tukey para a comparação de médias com 5% de probabilidade de erro.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Não foram observadas perdas de grãos nas avaliações antes da colheita, também chamadas de perdas naturais, ou seja, a colheita em todas as lavouras foi realizada no momento adequado. Não houve grãos encontrados no solo antes da operação de colheita que pudessem indicar queda espontânea decorrente de fatores como intempéries ou maturação excessiva. No entanto, observou-se a presença de vagens abertas ainda presas às plantas e com os grãos ainda em seu interior. Esse tipo de ocorrência indica que, embora não tenha havido perda efetiva dos grãos ao solo, a abertura das vagens pode representar um risco iminente de perda, caso haja atraso na colheita ou ocorrência de chuvas e ventos fortes.

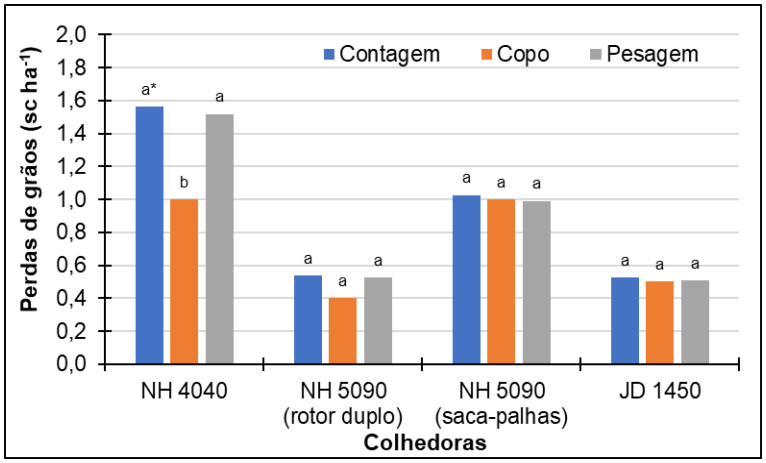
A abertura das vagens pode acelerar o processo de debulha natural, elevando as perdas caso a colheita não seja realizada no momento ideal, portanto, esse aspecto deve ser monitorado de perto. Segundo Mesquita et al. (2001), o atraso na colheita pode aumentar

ISBN 978-65-990392-6-3

consideravelmente as perdas por debulha natural, especialmente em condições de instabilidade climática, como ventos e chuvas após a maturação fisiológica da cultura.

Na figura 6 são apresentadas as perdas de grãos da cultura da soja na plataforma de corte das colhedoras avaliadas por diferentes métodos.

Figura 6. Perdas de grãos na plataforma de corte das colhedoras avaliadas por diferentes métodos.



* Médias seguidas por letras iguais na mesma colhedora não diferenciam entre si pelo Teste de Tukey (5%). Fonte: Autores (2025).

Podemos observar na figura 6 que os três métodos de avaliação das perdas de grãos apresentaram similaridade nos valores mensurados, com exceção na área da colhedora NH 4040, onde o método do copo identificou menores perdas, provavelmente devido a grãos menores, resultado do déficit hídrico que ocorreu nesta área.

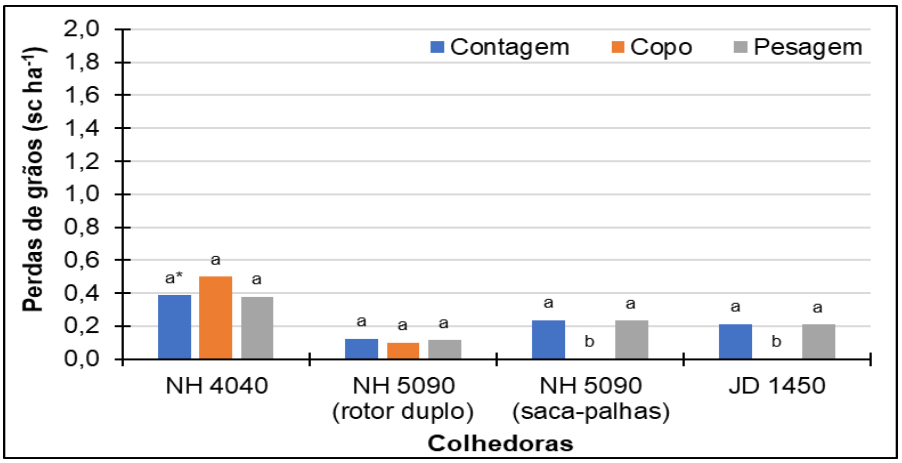
Nota-se um significativo volume de perdas de grãos na plataforma de corte em todas as colhedoras, com destaque para a colhedora NH 4040 que chegaram a 1,5 sc ha^{-1}. Isto pode ser atribuído ao fato da safra 2024/25 ser caracterizada por uma lâmina de chuvas abaixo da média, pois foi marcada pela ocorrência do fenômeno La Niña, embora com menor intensidade, impactou o verão 2024/25 no Rio Grande do Sul, com chuvas irregulares e tempo seco predominando. A Região Sul teve um verão com chuva espaçada e dias secos com altas temperaturas (INMET, 2025; IRGA, 2025). Essa falta de chuvas durante o ciclo, deixou as plantas com menor porte e mais fragilizadas, debilitadas, acelerando seu processo de maturação e facilitando a abertura das vagens ao contato com os mecanismos da plataforma, como o molinete e barra de corte, resultando em maiores perdas nesta etapa.

De acordo com Bezerra (2012), as perdas causadas pela plataforma de corte (barra de corte, molinete e caracol) são responsáveis, em média, por 80% a 85% das perdas na operação de colheita, sendo oriundas de mecanismos externos da colhedora e do estado de conservação desses componentes. Essas perdas incluem debulha, acamamento e corte das plantas acima da altura de inserção do 1° legume, oriundas do contato com a plataforma de corte.

ISBN 978-65-990392-6-3

As perdas de grãos nos mecanismos de limpeza e separação das colhedoras (figura 7), apresentaram resultados semelhantes entre os métodos avaliados. Pode-se observar valores baixos em todas as colhedoras avaliadas, com perdas de 0,4 sc ha^{-1} na colhedora NH 4040 e de em torno de 0,2 sc ha^{-1} nas demais. Cabe destacar que nas áreas colhidas pelas colhedoras NH 5090 (saca palhas) e na JD 1450 a avaliação das perdas de grãos pelo método de copo identificou perdas inferiores aos demais métodos, provavelmente devido a grãos menores resultado do severo déficit hídrico que ocorreu nestas áreas, que inclusive resultou em baixas produtividades.

Figura 7. Perdas de grãos na colheita da cultura da soja avaliadas por diferentes métodos nos mecanismos de limpeza e separação das colhedoras.



* Médias seguidas por letras iguais na mesma colhedora não diferenciam entre si pelo Teste de Tukey (5%). Fonte: Autores (2025).

Esses resultados indicam que os sistemas avaliados estavam adequadamente regulados, com boa eficiência de separação e limpeza dos grãos durante a colheita. A semelhança entre os métodos avaliativos reforça a confiabilidade dos dados obtidos e valida o uso de abordagens distintas como ferramentas eficazes para o monitoramento das perdas na colheita mecanizada da soja.

De acordo com Silva et al. (2015), perdas nos sistemas de trilha e separação das colhedoras são comuns quando os equipamentos estão desregulados ou operam fora das condições ideais, podendo representar até 10% das perdas totais se não forem bem ajustados.

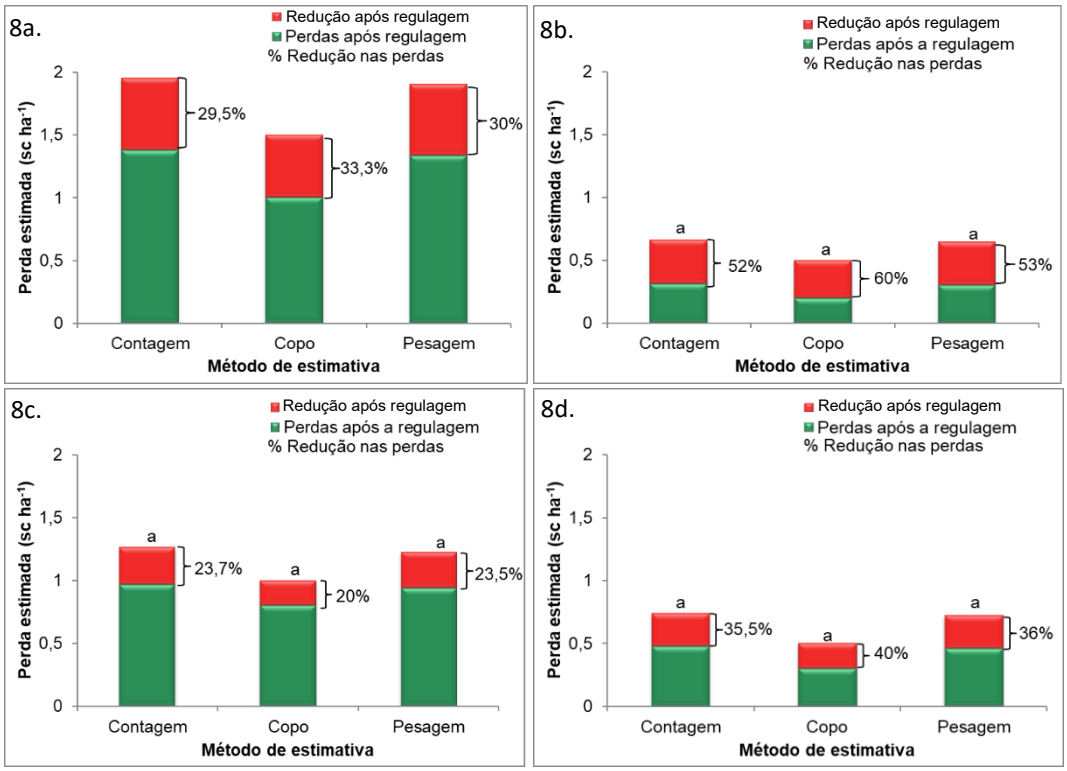
As avaliações das perdas totais de grãos na colheita da cultura da soja (figura 8) identificaram alta similaridade entre os métodos utilizados, especialmente entre os métodos da contagem e da pesagem, demonstrando coerência entre os métodos que utilizam parâmetros físicos diretos e mensuráveis, como o número de grãos e massa total, respectivamente.

O método do copo medidor apresentou valores menores de perdas, especialmente na área colhida pela NH 4040, o que pode ser atribuído à sua forma de quantificação baseada em volume, e não em peso. Essa diferença metodológica pode levar a uma subestimação das perdas, especialmente quando há variação na densidade dos grãos ou presença de impurezas,

ISBN 978-65-990392-6-3

como ocorre em áreas afetadas por déficit hídrico durante o ciclo da cultura da soja, especialmente no estádio de enchimentos dos grãos.

Figura 8. Perdas de grãos na colheita da cultura da soja avaliadas por diferentes métodos antes e após a regulagem das colhedoras, sendo 8a na colhedora NH 4040, 8b NH 5090 com rotor duplo, 8c NH 5090 com saca-palhas e, 8d JH 1450.



* Médias seguidas por letras iguais na mesma colhedora não diferenciam entre si pelo Teste de Tukey (5%). Fonte: Autores (2025).

Entre as colhedoras avaliadas, a New Holland 4040 e a NH 5090 (saca-palhas) apresentaram perdas superiores ao limite aceitável de 1 sc ha^{-1} (MESQUITA et al., 1998), ultrapassando o valor de referência recomendado para a cultura da soja. Obteve-se este resultado devido às elevadas perdas na plataforma de corte da colhedora, sendo o principal responsável a ineficiência da plataforma em acompanhar as variações no micro relevo do solo, resultando no não corte de plantas inteiras ou no seu corte acima da altura de inserção da primeira vagem, principalmente nas plantas mais baixas ou localizadas em áreas com desnível, que acabaram não sendo cortadas e ficaram para trás, resultando nas maiores perdas de grãos.

As colhedoras NH 5090 (rotor duplo) e a JD 1450 apresentaram as menores perdas de grãos, com valores médios de 0,5 sc ha^{-1}, bem abaixo do limite aceitável de 1 sc ha^{-1} (MESQUITA et al., 1998), indicando que ambas estavam bem reguladas e com qualidade na operação de colheita.

Na avaliação das perdas de grãos das colhedoras TC 5090, observa-se que a colhedora com sistema axial apresentou menores perdas, em média 0,5 sc ha^{-1}, enquanto o modelo equipado com trilha radial obteve perdas médias de 1,1 sc ha^{-1}. Isso se deve à

ISBN 978-65-990392-6-3

presença do duplo rotor no sistema axial, que proporciona uma separação mais eficiente dos grãos da palha, com menor agressividade e maior área de separação, resultando em menor quantidade de grãos descartados junto com os resíduos da cultura. Além disso, o sistema axial mostrou-se mais eficiente em áreas com alta infestação de plantas daninhas, como o nabo (*Raphanus raphanistrum*). Nessas condições, o rotor consegue processar melhor o material volumoso e fibroso, reduzindo entupimentos e mantendo a eficiência da separação, o que é uma vantagem significativa frente ao sistema radial.

De acordo com Conte et al. (2011), colhedoras com sistema axial apresentam maior eficiência de trilha e separação, especialmente em condições de elevada umidade e presença de materiais verdes, devido à maior área de separação proporcionada pelo rotor e à movimentação contínua do material no interior da máquina.

A análise comparativa dos métodos reforça a importância de se considerar a natureza da variável medida (peso vs. volume) na escolha da metodologia, e destaca a relevância do monitoramento contínuo das perdas durante a operação de colheita. Após realizados ajustes nas regulagens das colhedoras, foram novamente avaliadas as perdas totais de grãos (figura 8), onde pode-se observar diminuição das perdas e boa similaridade entre os métodos de avaliação.

Para reduzir as perdas de grãos, foi diminuída a velocidade do molinete das colhedoras, com a intenção de minimizar o impacto deste sobre as plantas e, consequentemente, reduzir a debulha das vagens e a perda de grãos. Também foi observada e ajustada a altura do molinete, de forma que o mesmo tocasse as plantas apenas no terço superior, evitando contato excessivo e pancadas fortes. A velocidade de deslocamento das colhedoras estava coerente com as condições da lavoura e, portanto, não foi ajustada.

Segundo Santos et al. (2010), ajustes adequados na velocidade e altura do molinete, bem como na velocidade de deslocamento da colhedora, são fundamentais para minimizar as perdas na colheita, especialmente as perdas por debulha antecipada e derrubada de plantas. Após realizados ajustes nas regulagens das colhedoras, pode-se observar reduções nas perdas de grãos de 55% na NH 5090 (rotor duplo), 35% na JD 1450, 30% na NH 4040 e 25% na NH 5090 (saca-palhas) (figura 8). A melhoria da performance das colhedoras fazendo pequenos ajustes nas regulagens resultou em redução média de 36,25% das perdas de grãos na colheita da cultura da soja.

Quanto aos sistemas de trilha axial e radial, comparando as duas colhedoras TC 5090, foram identificadas perdas de grãos de 0,9 sc ha^{-1} no sistema radial e de apenas 0,3 sc ha^{-1} no sistema axial. Esses resultados demonstram que as colhedoras de fluxo axial proporcionam menores perdas na colheita, pois possibilitam que a palha permaneça mais tempo dentro da máquina, melhorando a eficiência do sistema de trilha (MACHADO, 2004).

A produtividade da cultura da soja foi de 48,0 sc ha^{-1} na área colhida pela colhedora NH 4040, de 20,0 sc ha^{-1} na área colhida pelas colhedoras NH 5090 e de 28,0 sc ha^{-1} na área colhida pela colhedora JD 1450 (tabela 2). As perdas de grãos durante a colheita variaram de 5,81 a 2,33 % antes de realizados ajustes nas regulagens das colhedoras e, variaram de 4,5 a 1,35 % após realizados os ajustes, indicando a importância do monitoramento, atenção e cuidados no processo de colheita, de forma a otimizar os resultados da lavoura.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 2. Produtividade de grãos e resultado econômico da redução das perdas de grãos na colheita da cultura da soja.

Colhedora	Produt. (sc ha^{-1})	Perdas* (sc ha^{-1})	% perdas	Área (ha)	Redução* (sc ha^{-1})	R$ **
NH 4040	48,00	1,78	3,71	23,00	0,55	1.506,50
NH 5090 (rotor duplo)	20,00	0,60	3,01	60,00	0,33	2.380,00
NH 5090 (saca-palhas)	20,00	1,16	5,81	60,00	0,26	1.892,00
JD 1450	28,00	0,65	2,33	35,00	0,24	1.015,00
Média	29,00	1,05	3,62	Total 178,00	0,35	Total 6.793,50

* Média dos 3 métodos de avaliação. ** Considerando o valor de comercialização da soja de R$ 120,00 sc^{-1}. Fonte: Autores (2025).

Analisando os dados da tabela 2, pode-se observar que as perdas de grãos (médias dos 3 métodos de avaliação) variaram de 0,60 a 1,78 sc ha^{-1}, um pouco superior ao limite aceitável de 1 sc ha^{-1}, conforme Mesquita et al. (1998). Mas comparando estas perdas à produtividade de cada talhão, podemos observar que elas variaram de 2,33 a 5,81 %, sendo que, o maior valor percentual não corresponde ao 1,78 sc ha^{-1}, pois neste talhão a produtividade foi maior.

Ainda na tabela 2, pode-se observar que os ajustes nas regulagens das colhedoras proporcionaram ao produtor uma economia total de R$ 6.793,50, um significativo valor, especialmente em uma safra de baixas produtividades e baixo preço do produto, além de os ajustes realizados não demandarem nenhum desembolso por parte do produtor.

Assim, o monitoramento do processo de colheita da soja via aferição das perdas de grãos, proporciona o poder de quantificar de modo prático, rápido e eficiente, o volume de grãos perdidos pela máquina colhedora. Este resultado é influenciado pelas regulagens e pelos ajustes dos diversos sistemas componentes de um equipamento colhedor, o que permite realizar uma colheita mais eficiente, sem desperdícios, resultando em maior vida útil da máquina e em ganho real para o produtor (EMBRAPA SOJA, 2017).

4 CONCLUSÃO

A avaliação das perdas de grãos durante a colheita da soja mostrou-se uma importante ferramenta para a identificação de possíveis problemas nesta etapa do processo produtivo.

Foram identificadas perdas de grãos variando de 0,6 a 1,9 sc ha^{-1}, sendo os resultados semelhantes entre os métodos da pesagem dos grãos, da estimativa com auxílio de um copo medidor graduado e da contagem de número de grãos perdidos.

ISBN 978-65-990392-6-3

A realização de ajustes nas regulagens das colhedoras resultou em redução média de 36,25% das perdas de grãos na colheita, ressaltando a importância do monitoramento e acompanhamento do processo de colheita por um profissional capacitado, de forma a otimizar os resultados da lavoura e contribuir para a busca da sustentabilidade na produção da cultura da soja.

REFERÊNCIAS

AGEITEC. **Soja**: colheita. 2022. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/soja/arvore/CONTAG01_127_271020069134.html. Acesso em: 24 jun. 2025.

AGROLINK. **Colheita**. 2022. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/culturas/soja/informacoes/colheita_361522.html. Acesso em: 24 jun. 2025.

ATLAS SOCIOECONÔMICO. **Soja**. 2022. Disponível em: http://www.atlassocioeconomico.rs.gov.br/soja. Acesso em: 15 maio 2025.

BEZERRA, J. W. S. **Perdas na colheita do grão de soja: estudo experimental Fazenda Wehrmann**. Brasília: UnB, 2012. Disponível em: http://bdm.unb.br/bitstream/10483/4651/1/2012 _JoseWeslleydeSouzaBezerra.pdf. Acesso em: 24 jun. 2025.

BOLLER, W.; BORGES, J. M. Perdas na colheita de soja: é possível virar esse jogo? **Revista Plantio Direto**, n. 155, fev. 2017. Disponível em: https://plantiodireto.com.br/artigos/217. Acesso em: 17 jun. 2024.

CONTE, O. et al. Desempenho operacional de colhedoras com sistemas de trilha convencional e axial na cultura da soja. **Ciência Rural**, v. 41, n. 5, p. 836-842, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590 /S0103-84782011005000041. Acesso em: 4 jul. 2025.

COTRISOJA. **As perdas na colheita da soja influenciadas pelas colhedoras**. Disponível em: http://www.cotrisoja.com.br/as-perdas-na-colheita-da-soja-influenciadas-pelas-colhedoras/. Acesso em: 5 jun. 2025.

EMBRAPA SOJA. **História da soja**. 2017. Disponível em: https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/historia. Acesso em: 18 jun. 2025.

EMBRAPA. **Soja em números (safra 2020/2021)**. Disponível em: https://www.embrapa.br/web/portal/soja/cultivos/soja1/dados-economicos. Acesso em: 18 jun. 2025.

HEIFFIG, L.; CÂMARA, G. **Soja**: colheita e perdas. Piracicaba: Série Produtor Rural, 2006. 36 p.

INMET. **Fenômeno La Niña se aproxima do fim e entra na fase neutral**. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/noticias/fen%C3%B4meno-la-ni%C3%B1a-se-aproxima-do-fim-e-entra-na-fase-neutra. Acesso em: 16 jun. 2025.

ISBN 978-65-990392-6-3

IRGA. **Neutralidade no Oceano Pacífico está presente desde meados de fevereiro**. Disponível em: https://irga.rs.gov.br/neutralidade-no-oceano-pacifico-esta-presente-desde-meados-de-fevereiro. Acesso em: 4 jun. 2025.

MACHADO, A. L. T. Colhedoras de fluxo axial reduzem danos às sementes. **Revista Seed News**, v. 2, n. 4, 2004. Disponível em: http://www.seednews.inf.br/portugues/seed74/artigocapa74.shtml. Acesso em: 24 jun. 2025.

MARTIN, T. N. et al. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, safras 2022/2023 e 2023/2024**. Santa Maria: Editora GR, 2022.

MESQUITA, C.M.; COSTA, N.P.; MANTOVANI, E.C.; ANDRADE, J.G.M.; FRANÇA NETO, J.B.; SILVA, J.G.; FONSECA, J.R.; PORTUGAL, F.A.F.; GUIMARÃES SOBRINHO, J.B. **Manual do produtor**: Como evitar desperdícios nas colheitas da soja, do milho e do arroz. Londrina: EMBRAPA/CNPSo, 1998.

MESQUITA, C.M.; COSTA, N.P.; PEREIRA, J.E.; MAURINA, A.C.; ANDRADE, J.G.M. Caracterização da colheita mecanizada da soja no Paraná. **Engenharia Agrícola**, v.21, p.197-205, 2001.

REVISTA CULTIVAR. **Opções para colher bem**. Disponível em: http://www.grupocultivar.com.br/artigos/opcoes-para-colher-bem. Acesso em: 24 jun. 2025.

SANTOS, E. P. dos et al. Regulagem e operação da colhedora automotriz visando à minimização das perdas na colheita da soja. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 2, n. 1, p. 12-18, 2010.

SILVA, A. O. **Colheita de soja sem desperdícios**: como calcular e minimizar perdas. Blog Agroadvance, 2025. Disponível em: https://agroadvance.com.br/blog-colheita-da-soja-calculo-de-perdas/. Acesso em: 17 jun. 2025.

SILVA, R. P. da et al. Perdas na colheita mecanizada da soja em função do ajuste da colhedora. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 6, p. 1060-1072, 2015.

SILVEIRA, J.; CONTE, O. **Determinação de perdas na colheita de soja**: copo medidor da Embrapa. Londrina: Embrapa Soja, 2013. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/97495/1/Manual-Copo-Medidor-baixa-completo.pdf. Acesso em: 24 jun. 2025.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 76

AGRICULTURA DIGITAL NO MANEJO DE PRAGAS: COMPARAÇÃO ENTRE APLICAÇÕES LOCALIZADAS E EM ÁREA TOTAL NA SOJA

Digital agriculture in pest management: comparison between localized and total area applications in soybean

Gabrielle Bortolotti[1]; Luana Lüdtke[1]; Luiz Felipe Silveira Pavão[1]; André Müllich[1]; Caetana Nemitz[1] Ivan Carlos Maldaner[1]; Marcelo Silveira de Farias[1]; Luciano Zucuni Pes[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria-RS, Brasil, gabrielle.bortolotti@acad.ufsm.br, luana.ludtke@acad.ufsm.br, felipepavao14@gmail.com, andre.mullich@hotmail.com, ivan.maldaner@ufsm.br, marcelo.farias@ufsm.br, lucianopes@politecnico.ufsm.br, sgarbossa.jaqueline@ufsm.br

RESUMO

O uso de tecnologias está cada vez mais presente na agricultura, revelando-se como um forte aliado em aspectos econômicos e ambientais. Este trabalho foi conduzido na Área Agropecuária do Colégio Politécnico da UFSM, com o objetivo de realizar um comparativo entre aplicações de inseticidas localizadas e em área total para o controle de percevejos em um talhão agrícola cultivado com a cultura da soja. Foram utilizadas as plataformas digitais Farmbox e Climate FieldView para coletar dados, gerar mapas de calor e mapas de aplicação localizada. Estes mapas de aplicação foram exportados para o monitor do pulverizador autopropelido MF 8225, o qual possui válvulas de seção, que permitem o desligamento e acionamento da dispersão de calda. Considerando os custos com inseticidas e mão de obra para realizar o monitoramento, com o uso de aplicações localizadas foi encontrada uma economia média de 65,66% e uma eficiência semelhante no controle de percevejos em relação a aplicação em área total, além de vantagens relacionadas à sustentabilidade social e ambiental.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Pulverização. Tecnologias.

ABSTRACT

The use of technologies is increasingly present in agriculture, proving to be a strong ally in both economic and environmental aspects. This study was conducted at the Agricultural Area of the Colégio Politécnico of UFSM, aiming to compare localized and full-area insecticide applications for stink bug control in a soybean field. The digital platforms Farmbox and Climate FieldView were used to collect data and generate heat maps and localized application maps. These application maps were exported to the MF 8225 self-propelled sprayer monitor, which features section valves that allow the spray to be turned on and off. Considering the costs of insecticides and labor for monitoring, the use of localized applications resulted in an average savings of 65.66% and a similar efficiency in controlling bedbugs compared to full-area application, in addition to advantages related to social and environmental sustainability.

Keywords: Precision agriculture. Spraying. Technologies.

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) tem se consolidado como uma das principais culturas de grãos do Brasil, representando uma importante *commodity* e desempenhando papel estratégico tanto no abastecimento interno quanto nas exportações. Sua ampla adaptabilidade

ISBN 978-65-990392-6-3

às condições edafoclimáticas, alto valor comercial e múltiplas aplicações, desde a alimentação humana e animal até a produção de biocombustíveis, tornam a soja um dos pilares do agronegócio nacional (EMBRAPA, 2023; CONAB, 2025).

O cultivo de soja está frequentemente exposto ao ataque de pragas, dentre as quais os percevejos se destacam como uma das mais prejudiciais, pois podem causar danos diretos aos legumes e sementes, afetando a qualidade e a produtividade de grãos. O controle de percevejos é realizado por meio da aplicação de inseticidas, que devem ser utilizados seguindo os princípios do Manejo Integrado de Pragas (MIP), visando minimizar os impactos ambientais e os casos de resistência das pragas (CÔRREA-FERREIRA e ROGGIA, 2012).

Ao mesmo tempo em que há uma crescente demanda por alimentos, energia e demais produtos oriundos da agricultura, os recursos naturais estão cada vez mais escassos, o que impõe à produção agrícola a necessidade de se tornar cada vez mais eficiente e otimizada (COLAÇO; AMARAL; MOLIN, 2007). A produção da cultura engloba diversos processos, e o manejo impacta severamente nos custos totais, sendo que os custos variáveis englobam cerca de 68,5% dos custos de produção no Rio Grande do Sul (CONAB, 2025).

A agricultura de precisão pode ser definida como um sistema de gestão que leva em conta a variabilidade espacial dos talhões, com o objetivo de obter resultados sustentáveis no contexto social, econômico e ambiental. Dessa forma, a agricultura deixa de ser conduzida de forma uniforme e passa a considerar as especificidades de cada área do talhão, promovendo o uso racional de insumos (INAMASU et al., 2009).

Diante desse cenário, o avanço das tecnologias digitais aplicadas ao campo tem se mostrado uma ferramenta estratégica para aumentar a eficiência da produção. Técnicas como o sensoriamento remoto, o uso de imagens de satélite e de drones, além da amostragem georreferenciada de solo e da aplicação localizada de insumos, possibilitam ao agricultor tomar decisões mais embasadas, reduzindo desperdícios e maximizando resultados (COLAÇO; AMARAL; MOLIN, 2007). Além disso, essas ferramentas contribuem significativamente para a preservação dos recursos naturais e a redução dos impactos ambientais, alinhando-se às exigências de uma agricultura mais sustentável (INAMASU et al., 2009).

Nesse contexto, a aplicação localizada é uma forma de manejar as lavouras aplicando doses diferentes de insumos, de acordo com as necessidades de cada região da lavoura. Os conceitos de agricultura de precisão evidenciam que as lavouras não são homogêneas, pois apresentam manchas de variabilidade. Para trabalhar com essa variabilidade, a agricultura de precisão disponibiliza ferramentas que auxiliam na identificação, interpretação e recomendação de insumos de maneira diferenciada, permitindo o manejo específico por ambiente. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo realizar um comparativo entre aplicações de inseticidas localizadas e em área total para o controle de percevejos em um talhão agrícola cultivado com a cultura da soja no ano de 2024_2025.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

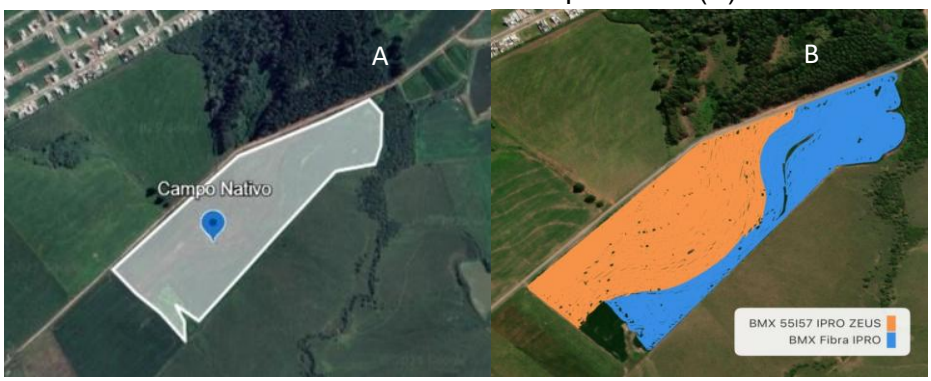
O trabalho foi conduzido na Área Agropecuária do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), na cidade de Santa Maria - RS, durante o período de desenvolvimento da cultura da soja, na safra 2024/2025. O local do estudo está situado nas coordenadas geográficas Latitude 29º43’20” Sul e Longitude 53º44’48” Oeste e altitude de, aproximadamente, 100 metros ao nível médio do mar. O talhão trabalhado (Figura 1 A) recebe

ISBN 978-65-990392-6-3

a denominação “Campo Nativo”, possui área de 14,53 ha e é cultivado no Sistema Plantio Direto (SPD), com trigo no inverno e soja no verão.

A semeadura da soja foi realizada no dia 05 de dezembro de 2024, com duas cultivares, representadas na Figura 1B, onde a região laranja indica a cultivar BMX ZEUS IPRO e em azul a BMX FIBRA IPRO. A densidade de semeadura média foi de 316.407 sementes por hectare.

Figura 1 – Localização e limites do talhão Campo Nativo (A) e mapa de semeaduras das cultivares no talhão Campo Nativo (B).

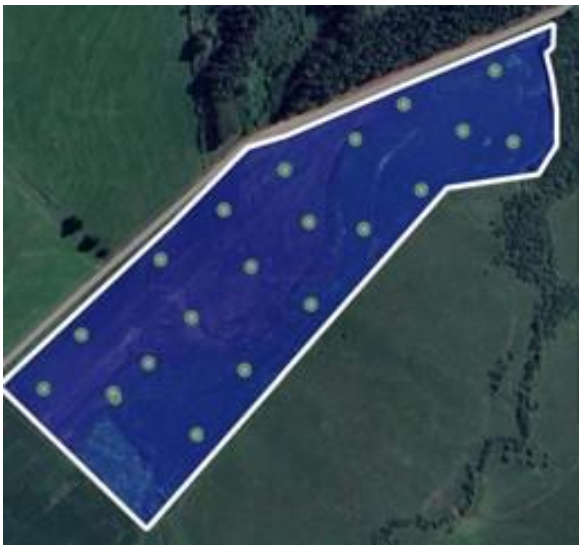


Fonte: Autores (2025)

2.2 COLETA, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Para o monitoramento de percevejos, foram determinados 25 pontos de avaliação georreferenciados no talhão, os quais foram dispostos em ziguezague (Figura 2), com o auxílio da plataforma Farmbox. Para cada amostragem, realizou-se a batida de duas linhas de vegetação sobre um pano branco de um metro linear, posicionado entre fileiras da cultura, totalizando área de coleta de um metro quadrado por amostragem. O monitoramento foi realizado duas vezes por semana. Foram seguidas as recomendações da Embrapa (2014), de 2 percevejos por pano de batida para a tomada de decisão de aplicação.

Figura 2 - Pontos amostrais georreferenciados utilizados para monitoramento de pragas no decorrer da safra.



Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

O monitoramento foi iniciado no dia 3 de janeiro de 2025, quando a soja se encontrava no estádio fenológico V9, de acordo com a escala fenológica de Fehr e Caviness (1977). Na data de 6 de abril de 2025, a lavoura se encontrava no estádio fenológico R7, caracterizado pelo início de maturação fisiológica, e a população da praga não excedia o nível de controle. Dessa forma, decidiu-se pelo encerramento do monitoramento e pela não recomendação de novas intervenções. A colheita foi realizada no dia 23 de abril de 2025.

O acompanhamento foi realizado preferencialmente no início da manhã (Figura 3), quando os indivíduos permanecem mais ativos e expostos nos estratos superiores do dossel, permitindo maior detectabilidade por meio do pano de batida. Ao longo do dia, com o aumento da temperatura, os insetos tendem a buscar refúgio nas porções internas e inferiores das plantas, reduzindo a probabilidade de detecção.

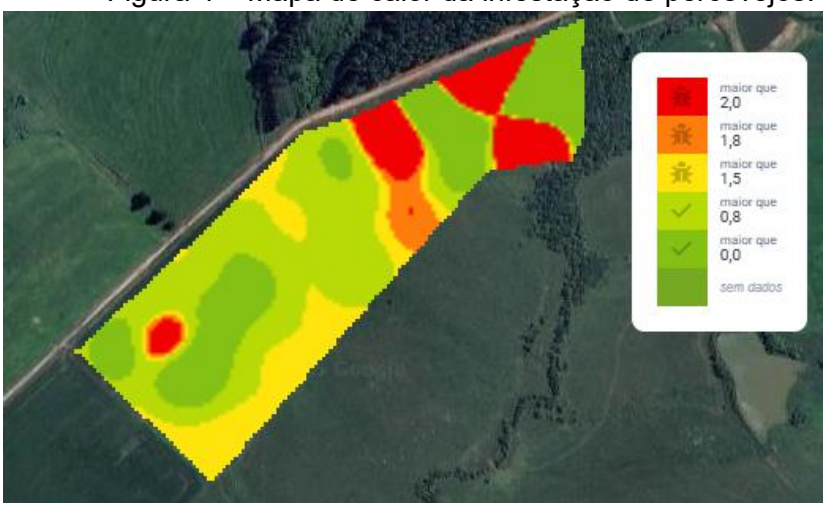
Figura 3 - Registro do monitoramento de pragas ao amanhecer.



Fonte: Autores (2025)

Após o monitoramento com o pano de batida, seguido da identificação e quantificação de percevejos, foram gerados os mapas de calor (Figura 4) com o auxílio da plataforma digital Farmbox, que utiliza o método de interpolação por krigagem. O mapa de calor é elaborado a partir da média de percevejos coletados por metro quadrado. Essa representação de gradiente de cores varia do verde ao vermelho, sendo que o verde indica a ausência de percevejos (0 percevejo por m^2) e o vermelho sinaliza infestação alta, com 2 percevejos por m^2.

Figura 4 – Mapa de calor da infestação de percevejos.



Fonte: Autores, 2025

ISBN 978-65-990392-6-3

A informação gerada a partir do Farmbox foi pareada com a plataforma Climate FieldView, onde geraram-se mapas de aplicação em formato específico para importação no monitor do pulverizador. Os mapas de aplicação elaborados apresentaram a cor verde nas regiões em que foi necessário aplicar inseticidas e vermelha nas regiões sem necessidade de intervenção. A taxa de aplicação utilizada neste estudo foi de 0 L ha^{-1} nas regiões em vermelho e 150 L ha^{-1} nas regiões em verde.

Os mapas de aplicação gerados foram transformados para arquivos em formato shapefile, repassados para um pen-drive e exportados para o monitor do pulverizador autopropelido. O equipamento utilizado foi o MF 8225, equipado com o monitor Topcon 3000, 28 metros de barra e válvulas de seções, que permitem o desligamento e acionamento da dispersão de calda.

Foi realizada a análise comparativa de custos considerando a metodologia de aplicação localizada e simulando a aplicação de inseticidas em área total. Essa análise levou em consideração apenas o investimento em inseticidas e em mão de obra para efetuar o monitoramento de pragas. Para isso, foi considerado o preço dos inseticidas na época da condução do estudo e a dose de cada insumo por hectare. Para estimar o custo com mão de obra, considerou-se que o monitoramento para aplicação localizada demandou 1,1 hora, enquanto o monitoramento para aplicação em área total demandaria 10 minutos. A partir disso, considerou-se o valor da hora trabalhada de R$ 6,42, de acordo com o decreto nº 11.864, de 27/12/2023.

Após a colheita do talhão, foi elaborado um mapa de produtividade de grãos. Nesta análise, foi realizada a filtragem das informações, removendo-se outliers (valores iguais a zero e discrepantes, que indicavam produtividades incoerentes com a realidade do talhão). Após a definição dos pontos aceitáveis, os dados foram interpolados por krigagem, utilizando o plugin SmartMap, no software livre QGIS. Esse processo permitiu a geração de um mapa mais consistente e representativo da variabilidade espacial da produtividade real obtida no talhão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na aplicação em área total, que normalmente também é realizada de forma calendarizada, comumente é organizado um cronograma para realizar as aplicações ao longo do ciclo da cultura, podendo ser com intervalos fixos ou em estádios fenológicos específicos. Este método não leva em consideração a presença ou o nível de infestação das pragas nas diferentes regiões do talhão. Dessa forma, pode ser visto como uma maneira de prevenir a infestação, no entanto, tende a causar desperdício de insumos. Por outro lado, na metodologia da aplicação localizada, como a realizada neste estudo, emprega-se o MIP, definido como um conjunto de tecnologias que inclui o uso racional de inseticidas, aplicados apenas quando necessário (EMBRAPA, 2023).

Neste sentido, após a coleta dos dados, foi necessária uma aplicação no dia 20 de fevereiro de 2025, com taxa de aplicação de 150 litros por hectare, utilizando o inseticida de nome comercial Hero (Zeta-cipermetrina e Bifentrina). O volume total de calda utilizado nesta aplicação foi de 726,2 litros, em uma área de 4,8 ha, representada pela cor verde na Figura 6. Considerando a área total do talhão, não foi necessário a aplicação de inseticidas em 9,7 ha. Dessa forma, ao operar com o sistema de aplicação localizada nesta primeira aplicação, foi economizado um total de 1453,3 litros de calda, o que evidencia a economia de insumos.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 5 - Mapa de aplicação localizada utilizado no dia 20/02/25 no talhão Campo Nativo.



Fonte: Autores (2025)

Seguiu-se com o monitoramento, e, no dia 19 de março de 2025, foi realizada uma nova pulverização localizada (Figura 6). O mapa de aplicação segue o mesmo padrão do primeiro, onde as regiões em verde representam locais com aplicação de inseticida e regiões em vermelho representam o fechamento das seções do pulverizador. Nesta aplicação, empregou-se o inseticida de nome comercial Galil SC (Imidacloprido e Bifentrina). O volume total de calda utilizado foi de 739 litros, em uma área de 4,9 ha. Considerando a área total do talhão, não foi necessária a aplicação em 9,5 ha, o que resultou em economia de 1440,5 litros de calda.

Figura 6 - Mapa de aplicação localizada utilizado no dia 19/03/25 no talhão Campo Nativo.



Fonte: Autores (2025)

É necessário ressaltar que, apesar da pulverização localizada não aplicar inseticidas em área total, o autopropelido sempre precisou percorrer todo talhão, o que não modifica de forma significativa o tempo de realização da operação e nem o consumo de combustível. Dessa forma, na Tabela 1 é apresentado o custo total investido para o controle de percevejos, considerando o custo com mão de obra e com inseticidas, na metodologia de aplicação localizada e em área total. Considerando a primeira e a segunda aplicação, os custos com

ISBN 978-65-990392-6-3

aplicação localizada foram 65,86% e 65,45% menores, respectivamente, em relação à aplicação em área total. Este resultado é superior ao obtido por Röhrs et al. (2025), que encontrou economia de até 50% com a aplicação localizada de inseticidas, em um talhão com área de 3,5 ha.

Tabela 1 – Comparativo de custos com inseticidas utilizando a metodologia de aplicação localizada e em área total para o controle de percevejos na cultura da soja.

Aplicação	Produto	Dose (L ha^{-1})	Área aplicada (ha)		Custo com mão de obra (R$)		Custo total (R$)	
			L	AT	L	AT	L	AT
1	Hero	0,2	4,8	14,53	7,06	1,07	208,7	611,3
2	Galil SC	0,4	4,9	14,53	7,06	1,07	281,5	814,8

Legenda: L = Aplicação de inseticidas localizada; AT = Aplicação de inseticidas em área total
Fonte: Autores (2025)

A comparação entre aplicação de inseticidas localizada e em área total evidencia mudanças de paradigma no manejo fitossanitário. A metodologia em área total desconsidera a presença real de pragas nas diferentes regiões dos talhões, resultando frequentemente em uso excessivo de inseticidas, o que pode favorecer o desequilíbrio ecológico, aumento de custos e surgimento de resistência em pragas (AIRES, 2019).

Já o uso da aplicação localizada, inserida no contexto MIP, é sustentado por decisões técnicas baseadas em monitoramento populacional, o que permite intervenções mais assertivas e sustentáveis (EMBRAPA, 2023). Além disso, a aplicação localizada favorece a preservação dos inimigos naturais, reduzindo riscos de resistência e contaminação ambiental. Ao não pulverizar áreas sem infestação significativa, interrompe-se o ciclo de resistência que se agrava com aplicações excessivas e indiscriminadas (EMBRAPA, 2022).

Como forma de analisar a eficácia do controle localizado no campo, na Figura 7 é apresentada a variabilidade da produtividade de grãos do talhão Campo Nativo. O mapa de produtividade evidencia uma predominância de áreas com rendimento entre 30 e 50 sacas por hectare, destacadas pelas cores laranja e amarelo, enquanto as regiões centrais e a porção leste apresentam núcleos de maior desempenho, alcançando entre 50 e 60 sacas por hectare.

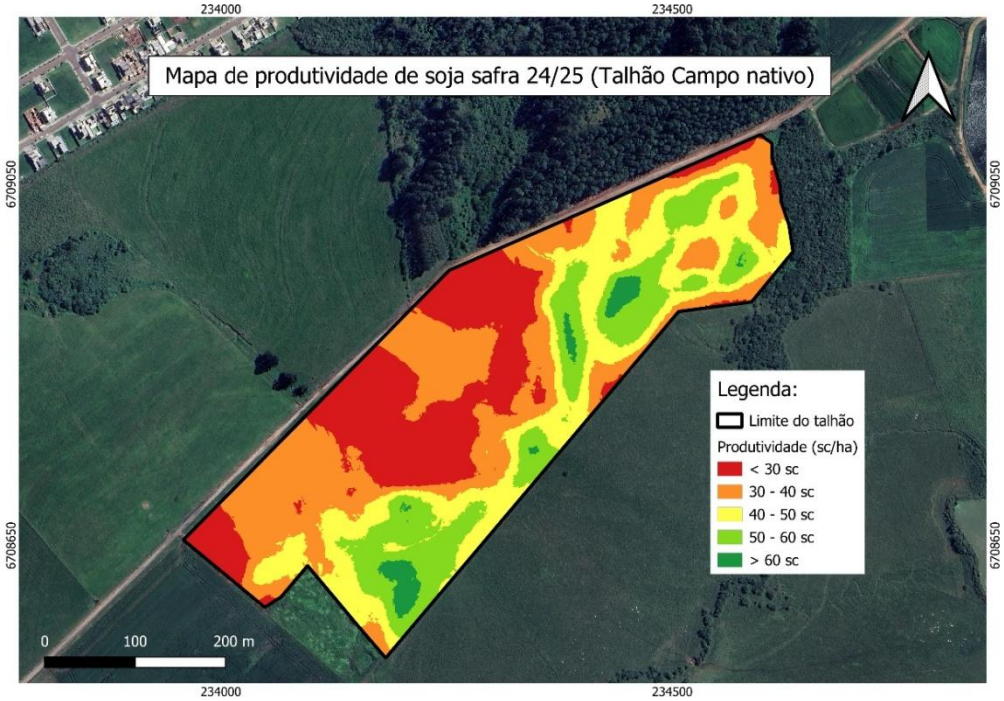
Nota-se que a variabilidade na produtividade de grãos tem relação com fatores como o uso de diferentes cultivares de soja no mesmo talhão, conforme já apresentado na Figura 1B deste trabalho. No entanto, visualmente não foi encontrada relação direta entre produtividade de grãos e regiões com ou sem aplicação de inseticidas, evidenciando que o uso da técnica não afetou negativamente o desempenho agronômico da cultura.

Ao analisar a média da produtividade de cada cultivar individualmente, percebe-se que a BMX ZEUS IPRO apresentou resultados similares a média da produtividade no estado do Rio Grande do Sul na safra 2024/2025, de 39 sacas por hectare (CONAB, 2025), já a cultivar BMX FIBRA IPRO expressou um desempenho superior ao estadual. Essa variabilidade entre as duas cultivares pode estar relacionada a disponibilidade hídrica dessa safra, em média o município de Santa Maria acumulou 406 mm (INMET, 2025) desde o dia da semeadura (05/12/24) até o dia da colheita (23/04/25) do experimento. A soja demanda precipitação acumulada de 450-800 mm (EMBRAPA, 2013), ou seja, as condições meteorológicas

ISBN 978-65-990392-6-3

observadas foram limitantes para o desenvolvimento da cultura e prejudicou a produtividade final.

Figura 7 - Mapa de produtividade do talhão do Campo Nativo.



Fonte: Autores (2025)

4 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a aplicação localizada de inseticidas para o controle de percevejos na cultura da soja apresenta vantagens em relação à aplicação em área total. O uso de insumos apenas em áreas infestadas por percevejos gerou uma economia média de 65,66%, considerando o custo com mão de obra e inseticidas, sem afetar a eficiência agronômica da lavoura. Isso evidencia a importância do monitoramento populacional para a tomada de decisão baseada em dados, destacando a efetividade do Manejo Integrado de Pragas (MIP). A aplicação localizada permite entender e tratar o talhão a partir de como ele está, sem fazer aplicações excessivas.

Além disso, o trabalho destacou a importância de usar tecnologias digitais como estratégia para aumentar a eficiência da produção agrícola. A geração de mapas de calor pelo Farmbox, integrados ao monitor do pulverizador MF 8225, mostrou-se preciso para tomadas de decisões, permitindo ajustar a aplicação de inseticidas conforme a necessidade específica de cada região do talhão.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar a nossa sincera gratidão aos que colaboraram na execução desta pesquisa e pelo apoio na condução deste trabalho, assim como às empresas responsáveis pelas plataformas digitais Farmbox e Climate FiedView, pela disponibilização das ferramentas.

ISBN 978-65-990392-6-3

REFERÊNCIAS

AIRES, R. **Resistência a defensivos agrícolas.** Disponível em: < https://agriq.com.br/resistencia-a-defensivos-agricolas/> Acesso em: 27 ago. 2025.

ALMEIDA, J. S. de et al. Can Metarhizium anisopliae reduce the feeding of the Neotropical brown stink bug Euschistus heros on soybean seeds? **Fungi**, v. 11, n. 4, p. 247, 2025. Disponível em: https://www.mdpi.com/2309-608X/11/4/247.

BUENO, A. de F. et al. **Desafios do manejo integrado de percevejos na cultura da soja:** implicações produtivas e econômicas. Embrapa Soja. Evento Técnico. Londrina, jul. 2024. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1166046/1/ETC-4-JA-2024.pdf. Acesso em: 6 ago. 2025.

BUENO, R. C. O. F. et al. Augmentative biological control of stink bugs on soybean: the Brazilian scenario. **CABI Agriculture and Bioscience**, v. 5, n. 24, p. 1–13, 2024. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1186/s43170-024-00264-9.

COLAÇO, A.F..; AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P. **Agricultura de Precisão 2015**. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=MX7jCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT5&dq=agricultura+de+precis%C3%A3o&ots=K4eeDhVimW&sig=wG3cN3fHftJmNY0QY1E2v8AHMiw&redir_esc=y#v=onepage&q=agricultura%20de%20precis%C3%A3o&f=false>. Acesso em: 29 de julho de 2025.

COLAÇO, A. F.; AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P. **Introdução à agricultura de precisão**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2007. 45 p. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=MX7jCgAAQBAJ.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira:** grãos, safra 2024/2025. Brasília: CONAB, 2025. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras.

CORRÊA-FERREIRA, B.S.; ROGGIA, S. **Manejo integrado de percevejos na cultura da soja:** antes, durante e pós-safra da soja. 2012. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/926849/1/beatriz.pal.2012.pdf>. Acesso em: 04 set. 2025.

EMBRAPA**. Manejo Integrado de Pragas da Soja – MIP-Soja**. Portal Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/6039/manejo-integrado-de-pragas-da-soja---mip-soja>. Acesso em: 07 ago. 2025.

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja – Região Central do Brasil:** 2023/2024. Londrina: Embrapa Soja, 2023. Disponível em: https://www.embrapa.br/soja/publicacoes.

EMBRAPA. **Resultados do Manejo Integrado de Pragas da soja na safra 2013/14 no Paraná.** Londrina: Embrapa Soja, 2014. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/996841/1/Resultadosdomanejoin

ISBN 978-65-990392-6-3

tegradodepragasdasojanasafra201314noParana.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 04 set. 2025.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja** – Região Central do Brasil 2013. Londrina: Embrapa.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of soybean development. **Special Report**, v. 80, 12 p., 1977.

FERREIRA, L. A. et al. Uso de plataformas digitais no manejo de pragas em culturas extensivas: avanços e desafios. **Revista Brasileira de Agricultura de Precisão**, v. 6, n. 1, p. 1–10, 2022. Disponível em: https://revistaagriculturadeprecisao.org.br/rbap/article/view/120.

GONÇALVES, M. A. et al. Aplicação localizada de inseticidas com base em dados geoespaciais no controle de Euschistus heros. **Cadernos de Agroecologia**, v. 16, n. 2, 2021. Disponível em: https://cadernos.aba-agroecologia.org.br/index.php/cadernos/article/view/29349.

INAMASU, R. Y. et al. **Agricultura de precisão:** estado da arte e perspectivas para os próximos 10 anos no Brasil. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2009. (Documentos, n. 74). Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/579311/agricultura-de-precisao-estado-da-arte-e-perspectivas-para-os-proximos-10-anos-no-brasil.

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. **Banco de Dados Meteorológicos**, 2025. Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/. Acesso em: 02 set. 2025.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. Agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M. (org.). **Agricultura de precisão:** resultados de um novo olhar. 2. ed. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2015. cap. 2, p. 23–49. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1020264/agricultura-de-precisao-resultados-de-um-novo-olhar.

RÖHRS, G. M. et al. Manejo localizado. **Revista Cultivar Máquinas**, v. 24, p. 16-19, 2025.

SALDANHA, M. E. V. et al. An extensive survey of stink bug species composition on soybean in Brazil. **Pest Management Science**, 2024. Pré-publicação disponível em: https://www.researchgate.net/publication/392767781.

STEINHAUS, M. et al. Intra- and Interspecific Variation in the Susceptibility to Insecticides of Stink Bug Species Collected from Soybean and Corn Fields in Southern Brazil. **Journal of Economic Entomology**, v. 115, n. 2, p. 636–645, 2022. Disponível em: https://academic.oup.com/jee/article/115/2/636/6513021.

STEINHAUS, E. A. et al. Variação na suscetibilidade a inseticidas em percevejos da soja no Sul do Brasil. **Journal of Economic Entomology**, v. 115, p. 631–636, 2022. DOI: 10.1093/jee/toac013.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 77

DESEMPENHO OPERACIONAL E ECONÔMICO DE MÁQUINAS E IMPLEMENTOS DE PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA

OPERATIONAL AND ECONOMIC PERFORMANCE OF AGRICULTURAL SPRAYING MACHINES AND IMPLEMENTS

Luis Paulo Baldissera Schorr[1], Igor Luis Muller[1], Sabrina Tolotti Peruzzo[1], Daniela Priori Pereira[1], João Miguel Taufer Alves[1], Laína Vitória Grasselli[1], Juhan Vitor Alves Pedon[1], Eliége Lampert[1]

[1] Centro de Ensino Superior Riograndense – CESURG, Rod. Leonel de Moura Brizola (BR 386), KM 138, Bairro Beira Campo,99560-000, Sarandi – RS, Brasil, luis.schorr@cesurg.com igormuller@cesurg.com, sabrinaperuzzo@cesurg.com, danielapriori@cesurg.com, joaoalves@cesurg.com, lainagrasselli@cesurg.com, juhanpedon@cesurg,com, eliegelampert@cesurg.com

RESUMO

A análise de rendimento das máquinas e implementos de pulverização é um ponto chave para a obtenção de bons ganhos produtivos. Diante disso, este trabalho tem como objetivo caracterizar diferentes formas de aplicação, verificando o desempenho operacional e econômico. Os tratamentos utilizados para desenvolver o trabalho, foram 3 tipos de pulverizadores, sendo um montado da marca JACTO modelo Condor 800, um autopropelido Stara Imperador 3.0 e de um drone AGRAS DJI T30. Os pulverizadores foram avaliados quanto a critérios de rendimento operacional e rendimento econômico. Os dados de rendimento operacional foram submetidos à análise de variância e comparados pelo teste de Tukey. Pode-se comprovar que os tratamentos diferem estatisticamente quanto ao rendimento, sendo que pulverizadores autopropelidos apresentam a maior média de capacidade operacional, enquanto pulverizadores convencionais e drones não diferem entre si.

Palavras-chave: Rendimento. Mecanização. Atividades agrícolas.

ABSTRACT

Analyzing the performance of spraying machines and implements is key to achieving good productivity gains. Therefore, this study aimed to characterize different application methods, verifying their operational and economic performance. The treatments used in this study were three types of sprayers: a mounted JACTO Condor 800, a self-propelled Stara Imperador 3.0, and an AGRAS DJI T30 drone. The sprayers were evaluated based on operational and economic performance criteria. The operational performance data were subjected to analysis of variance and compared using the Tukey test. It was possible to verify that the treatments differ statistically in performance, with self-propelled sprayers presenting the highest average operational capacity, while conventional sprayers and drones did not differ.

Keywords: Performance. Mechanization. Agricultural activities.

1 INTRODUÇÃO

Centros de pesquisa fornecem informações em um ritmo acelerado, fator que aliado à mobilidade e conectividade da população leva a grandes mudanças que ocorrem no mundo. Quando falamos em agricultura, as pesquisas geram novas informações que são rapidamente

ISBN 978-65-990392-6-3

incorporadas aos sistemas de produção, levando a diversas mudanças positivas, a fim de automatizar e contribuir para suprir a demanda de produção que se encontra cada vez maior (EMBRAPA, 2017).

Conforme se tornam mais escassas as formas de ampliação de locais destinados a cultivos agrícola, devemos buscar novas formas de produção, utilizando de ferramentas capazes de melhorar toda a cadeia produtiva, buscando a maior qualidade, a redução de custos e, bem como utilização de novas estratégias gerenciais e organizacionais para aumentar a eficiência de todas as atividades do setor agrícola (BECKER et al., 2020). Uma das formas de melhorar as atividades desenvolvidas para atingir o máximo potencial produtivo das áreas é o manejo da cultura, tendo por base a correta aplicação dos produtos, e uso de dosagens recomendadas para controle de pragas, doenças e plantas daninhas (COSTA et al., 2015).

Dentre as inovações vistas nos últimos anos destaca-se a utilização de técnicas e equipamentos que auxiliam o produtor na maximização dos processos e um controle com melhores resultados (CASTRO; BIAZOTTO; ROMÃO, 2019). Por exemplo, os drones foram inseridos na agricultura como forma de facilitar e revolucionar a produção, colaborando com o incremento de tecnologia, fornecendo a todos os tipos de produtores maior facilidade e precisão, automatizando suas tarefas e auxiliando no alcance de bons picos de produção, junto com um acompanhamento e monitoramento de sua área (ANDRADE, 2016).

Esse processo de inovação tecnológica tem papel fundamental na agricultura, pois potencializa o acréscimo de eficiência, a redução de desperdício, a mitigação o impacto ambiental e a segurança dos colaboradores (BAESSO et al., 2014), afetando significativamente na lucratividade com a economia gerada pelo uso controlado de insumos quanto no impacto da produção agrícola no meio ambiente (MÜLLER, 2021).

É importante ressaltar as diferenças tecnológicas em termos de diversidade entre os agricultores, seus produtos e localizações geográficas. Desta forma, a escolha e adoção desses meios tecnológicos se dá muitas vezes pela análise microeconômica onde esse produtor está inserido (SILVEIRA; FILHO, 2012). Outro fator que afeta consideravelmente uma produção é a extensão de área a ser planejada, considerando a assertividade que se busca para que pequenos produtores consigam retirar o máximo do estabelecimento, onde muitas vezes um investimento alto em um maquinário tecnológico se torna inviável em um curto espaço de tempo.

Portanto, é de grande importância realizar uma análise operacional no momento da aplicação de defensivos agrícolas, a fim de que seja utilizado o equipamento mais adequado, permitindo rapidez na aplicação e racionalização de custos, sem ocasionar prejuízos na eficiência do controle fitossanitário (MACHADO et al., 2015).

Mesmo sendo uma área em grande desenvolvimento nos últimos anos, ainda é incipiente as publicações que compararam a pulverização realizada pelos maquinários agrícolas. Portanto, o objetivo deste trabalho é caracterizar diferentes formas de aplicação, verificando o desempenho operacional e econômico, a fim de gerar informações importantes, qualitativas e quantitativas de qual modelo usar e que melhor se adequa a realidade da propriedade rural.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento intitulado “Desempenho operacional e econômico de máquinas e implementos de pulverização agrícola” foi conduzido em propriedades rurais da região norte do estado do Rio Grande do Sul.

ISBN 978-65-990392-6-3

O clima local, conforme classificação de Köeppen é tipo Subtropical úmido (Cfa), caracterizado pela ausência de estação seca e por precipitação bem distribuída ao longo do ano (ALVARES et al., 2013). Conforme dados evidenciados para o município, evidencia uma temperatura média de 20,3º C e a precipitação anual de 1957,5 mm para o município em que a área está localizada (ZEPNER et al., 2020). Quanto as características edáficas, o solo é caracterizado pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018) como latossolo vermelho distrófico típico de textura argilosa.

O experimento foi desenvolvido em áreas de cultivo de soja, analisando informações e critérios provenientes dos seguintes tratamentos:

- Tratamento I – Pulverizador convencional JACTO CONDOR 800 AM18, capacidade de 800 litros de calda de pulverização e composto por barras de 18 metros.
- Tratamento II – Pulverizador Autopropelido STARA IMPERADOR 3.0, capacidade de 2400 litros de calda de pulverização e composto por barras de 27 metros.
- Tratamento III – Drone Pulverizador AGRAS DJI T30, capacidade de 30 litros de calda de pulverização e composto por 16 bicos, fornecendo uma largura de pulverização de 9 metros.

As aplicações foram realizadas em áreas de soja de estádio V6 e V7 da cultura pelo período da manhã. No momento da aplicação foram mensuradas as faixas de aplicação e velocidade de deslocamento utilizando trena e cronômetro. A partir destas informações pode-se definir as seguintes análises.

Utilizando das variáveis mensurados em campo será realizado o cálculo da capacidade operacional com base na Equação 1:

$$CO = \frac{L * V * EF}{10} \quad (1)$$

Sendo: CO = capacidade operacional (ha h^{-1}), L = largura da barra, V = velocidade de deslocamento e EF= eficiência da operação (valor pré-definido que varia entre 0,5 e 0,7, dependendo das características dos talhões, da forma de reabastecimento, etc.).

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro–Wilk), homocedasticidade (Teste de Bartlett) e verificação de autocorrelação dos resíduos (Teste de Durbin–Watson). Quando necessário, aplicaram-se transformações (por exemplo, log ou raiz quadrada). A análise foi realizada por ANOVA e, em caso de significância, comparações múltiplas pelo teste de Tukey (α = 0,05). Todos os procedimentos foram executados no R (R Core Team, 2025).

Para análise econômica da aplicação de cada um dos tratamentos foi enviado um questionário de perguntas para prestadores de serviços, produtores rurais e empresas com perguntas relacionadas a valores cobrados pela realização de aplicações de cada um dos serviços prestados. Esta entrevista foi realizada de forma online e presencial, sendo as perguntas: 1) Qual o tipo de serviço de pulverização; 2) Qual o valor do serviço? 3) Qual o valor mínimo para realização deste serviço?

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

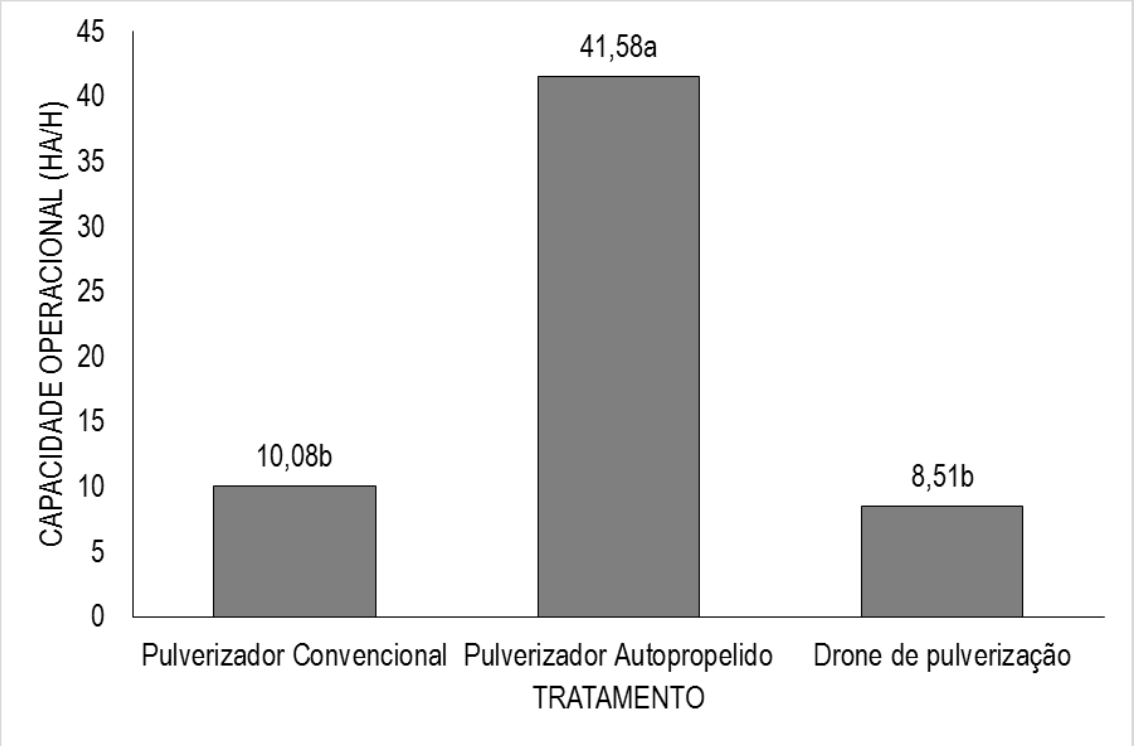
Considerando as condições em que o trabalho foi realizado, analisando os resultados pode-se aceitar a hipótese de que as diferentes máquinas e/ou implementos de pulverização utilizados por produtores rurais possuem diferentes rendimentos operacionais. Portanto, esta é

ISBN 978-65-990392-6-3

uma das variáveis que precisa ser considerada para a tomada de decisão nas atividades agrícolas.

Para a variável capacidade operacional (Figura 1) a ANOVA indicou efeito significativo dos diferentes tratamentos (Pr>Fc = 0,00058), além de apresentar elevada dispersão com CV de 49,74%.

Figura 1. Capacidade operacional (ha h^{-1}) das diferentes máquinas e implementos agrícolas utilizados para a pulverização de lavouras.



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey a 5 % de significância.
Fonte: Autores (2025).

A Figura 1 demonstra que o pulverizador autopropelido possui a maior capacidade operacional (41,58 ha h^{-1}), a qual diferencia-se estatisticamente dos tratamentos e é 4 vezes superior aos demais. Além disso, verificou-se similaridade estatística pelo Teste de Tukey para os tratamentos pulverizador convencional e drone de pulverização, indicando que nas condições do experimento, os mesmos não são diferentes quanto à capacidade operacional.

A média observada para os pulverizadores de barras (Figura 1) está próxima a obtida por Junior (2020), o qual analisando a capacidade operacional de pulverizadores de barras no Brasil dos anos de 2008 a 2018 obteve valores médios regionais variando entre 9,1 a 36,2 ha h^{-1}. O autor destaca que o menor valor está ligado à predominância de pulverizadores montados, enquanto a maior média tem relação a maior quantidade de pulverizadores autopropelidos. Quanto ao rendimento observado para o drone de pulverização, o mesmo também se encontra próximo ao observado pela literatura, a qual indica um rendimento de até 10 ou 12 ha h^{-1} (A LAVOURA, 2022).

A superioridade do pulverizador autopropelido concorda com a afirmação de Santos e Goedel (2022), os quais afirmam que pulverizadores autopropelidos são máquinas agrícolas de alto desempenho operacional, o que pode ser explicado pelo projeto de sua estrutura.

ISBN 978-65-990392-6-3

O pulverizador autopropelido apresenta diversas vantagens comparado aos outros métodos, como maior economia nos custos de produção e insumos, possibilidade de uso em agricultura de precisão de alto nível, redução de riscos e de conforto ao operador, planejamento de pulverização para maior eficiência e otimização operacional, além principalmente, de um maior rendimento. Quanto ao resultado pode-se pontuar que a maior capacidade operacional de pulverizadores autopropelidos está relacionada com a maior velocidade média de deslocamento e ao maior tamanho das barras de pulverização, uma vez que há uma relação positiva entre a quantidade de hectares tratados com a velocidade e tamanho de barras. Esses dois fatores são descritos por Richey (1961), que indica que a capacidade de campo de máquinas agrícolas depende da largura de trabalho da máquina e da velocidade de deslocamento.

Santos (2022) verificando o rendimento de distribuidores autopropelidos identificaram essa relação positiva entre rendimento e velocidade, uma vez que o aumento da velocidade de aplicação resultou no aumento da área tratada. O estudo de Chagas et al. (2012) analisando a influência de diferentes pressões de serviço e velocidades no rendimento operacional de um pulverizador de barras também concluíram que quanto maior a velocidade de deslocamento do conjunto trator/pulverizador, maior é a capacidade operacional teórica e menor o volume de calda distribuída.

Quando estudada a questão do tamanho das barras de pulverização, verifica-se que o pulverizador autopropelido possui maior extensão. Santos e Goedel (2022) destacam a grande extensão de ponta a ponta das barras de pulverização como um dos principais fatores que influenciam no alto rendimento operacional desta máquina agrícola. Além disso, cabe pontuar que esta extensão tem influência positiva na diminuição do amassamento das culturas. Destaca-se que pulverizadores autopropelidos apresentam elevada eficiência operacional devido à largura das barras e à autonomia em campo, o que proporciona maior rendimento das aplicações permitindo maior área coberta em menor tempo e, consequentemente, aumento da produtividade no manejo fitossanitário (SANTOS, 2022).

Este trabalho identificou similaridade estatística para a capacidade operacional de drones e de pulverizadores convencionais, sendo estas respectivamente 10,08 e 8,51 ha h^{-1}. Suas respectivas capacidades operacionais estão relacionadas à suas limitações de quantidade de produto, tamanho de área de trabalho e qualidade operacional, levando em conta comprimento e velocidade de atuação.

Considerando que ambos possuem mesmo rendimento, a literatura sugere algumas vantagens no uso de drones, como por exemplo: menor amassamento, menor compactação do solo e possibilidade de aumento da área de produção (ROSA; LAZARRI; TRES, 2022). Por exemplo, produtores rurais da cultura do milho estão alterando às últimas aplicações de defensivos e fertilizantes para aplicações com drones, substituindo a utilização de pulverizadores convencionais a fim de evitar o amassamento e possíveis perdas em produtividade.

Segundo estudos de Pennachi (2023), os drones podem aplicar produtos em áreas específicas das lavouras, sem que haja o desperdício de produto em plantas que não necessitem do manejo. Além disso, o uso de drones não causará compactação do solo ou danos por derrubada ou desenraizamento de plantas, o que é comum em outras tecnologias. As condições do terreno geralmente limitam o acesso de máquinas mais pesadas, o que não é o caso dos drones. Vale destacar que no caso dos drones, o rendimento está associado não apenas à velocidade operacional, mas também à precisão da aplicação. Pesquisam indicam que o mesmo além de evitar o amassamento das plantas, reduz a compactação do solo e promove aplicações localizadas com menor desperdício de insumos, resultando em ganhos indiretos de rendimento e preservação da lavoura (ZHANG et al., 2023).

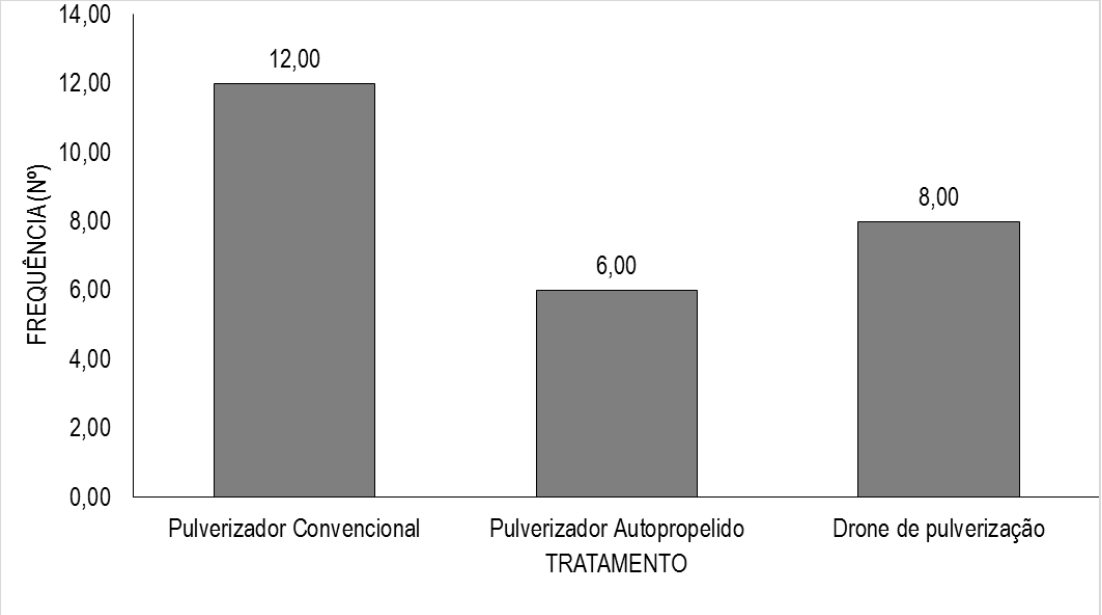
ISBN 978-65-990392-6-3

Machado et al. (2015) enfatiza que a análise operacional de equipamento de aplicação de defensivos agrícolas é fundamental para a escolha do equipamento mais adequado para o ambiente, além de gerar maior rapidez de aplicação e racionalização de custos.

Também, salienta-se que a análise deste rendimento é de grande valia para os produtores rurais, uma vez que quanto maior o desempenho operacional, maior será a economia de recursos naturais e financeiros (JUNIOR et al., 2013). Machado et al. (2015) acrescenta que estudos sobre o rendimento de máquinas agrícolas podem auxiliar na redução de volumes de aplicação, ganhos de hectares tratados em menor tempo, economia de combustíveis, etc.

Quanto aos critérios econômicos foram obtidas 26 respostas das entrevistas realizadas, sendo que 46% foram serviços de pulverizador convencional, seguido por 31 % de serviços de drone e 23% de pulverizador autopropelido (Figura 2). Vale salientar que o maior percentual de serviços de pulverizador convencional já era esperado tendo em vista que a região é composta por pequenas propriedades, onde inúmeros produtores rurais da região prestam o serviço utilizando este tipo de implemento pela quantidade de área.

Figura 2. Frequência de prestadores de serviço entrevistados em função do tipo de tratamento.



Fonte: Autores (2025).

A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva para os valores cobrados pelos serviços de pulverização. Importante salientar que as respostas informam valores por hectare e não pelo tempo de trabalho (horas), carácter comum para a região.

Analisando os resultados da tabela é importante salientar que o pulverizador convencional apresenta os menores valores médios de pulverização, seguidos pelos drones e pelo autopropelido. Contudo, considerando que nas áreas de cultivo trabalha-se com condições climáticas, por vezes os produtores devem considerar um maior custo para dar maior agilidade aos serviços e conseguir realizar a pulverização antes de chuvas, por exemplo.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 1. Estatística descritiva do valor cobrado pelos serviços de pulverização (R$.h^{-1}).

Estatística	Pulverizador Convencional	Pulverizador Autopropelido	Drones de Pulverização
Média	114,83	178,33	135,00
Mínimo	60,00	100,00	100,00
Máximo	160,00	270,00	170,00
Desvio	30,02	54,19	23,29

Fonte: Autores (2025)

Por fim, vale salientar que as respostas da última pergunta (3 - Qual o valor mínimo para realização deste serviço?) foi somente considerada por prestadores de serviço de drones e de autopropelido, considerando faixas mínimas de 4-7 hectares para drones e 30-100 hectares para autopropelido. Diante disso, os produtores devem analisar os critérios de rendimento, econômicos e as condições climáticas para escolher o melhor maquinário a realizar pulverizações em suas propriedades.

4. CONCLUSÃO

Com a realização deste trabalho constata-se que os diferentes implementos agrícolas apresentam particularidades conforme suas funções e tecnologias. Os autopropelidos estão entre os mais ágeis e que possuem o melhor rendimento operacional dentre os estudados, com maior eficiência produtiva, contudo apresentam valores de serviços mais altos. Os drones possuem particularidades que devem ser estudadas e consideradas, pois possuem rendimento similar aos pulverizadores convencionais e diminuem o amassamento de lavoura, com preço médio similar, sendo, portanto, um método atrativo aos produtores que buscam facilidade e economia consequente a propriedade.

A tecnologia que chega aos produtores com a facilitação e incrementação desses equipamentos é muito importante, tendo em vista que trabalhamos e encontramos diversos modelos de propriedades rurais, de diferentes tamanhos e particularidades geográficas. Para a análise de resultados e implementação, novos estudos devem ser realizados, incluindo fatores como rendimento de combustível, tipo de cultivo agrícola e deslocamento até a área que se pretende pulverizar.

REFERÊNCIAS

A LAVOURA. **Aplicações com drones podem cobrir até 12 hectares por hora de operação.** 2022. Disponível em: https://alavoura.com.br/agricultura/tecnicas-agricolas/aplicacoes-com-drones-podem-cobrir-ate-12-hectares-por-hora-de-operacao/. Acesso em: 31 maio 2025.

ISBN 978-65-990392-6-3

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **MeteorologischeZeitschrift,** v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

ANDRADE, R. O. Drones sobre o campo: avanços tecnológicos ampliam as possibilidades do uso de aeronaves não tripuladas na agricultura. **Revista Pesquisa FAPESP**, 2016. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/drones-sobre-o-campo/. Acesso em: 1 set. 2025.

BAESSO, M. M. et al. Tecnologias de aplicação de agrotóxicos. **Revista Ceres**, v. 61, p. 780-785, 2014.

BECKER, R. S. et al. Inovações tecnológicas em máquinas agrícolas para controle de plantas daninhas. **Tecno-Lógica**, v. 25, n. 1, p. 98-108, 2020.

CASTRO, J. R.; BIAZOTTO, K. F.; ROMÃO, M. P. **Tecnologias aplicadas à agricultura: utilização de drones para atividades agrícolas.** 2019. Disponível em: https://fateclog.com.br/anais/2019/TECONOLOGIAS%20APLICADAS%20À%20AGRICULTURA%20UTILIZAÇÃO%20DE%20DRONES.pdf. Acesso em: 1 out. 2025.

CHAGAS, K. et al Rendimento operacional de um pulverizador de barras em diferentes pressões de serviço e velocidades**. Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 8, n. 14, p. 827-832, 2012.

COSTA, M. F. et al. Tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 22, p. 886, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). A tecnologia na Agricultura. 2017. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/30015917/artigo-a-tecnologia-na-agricultura. Acesso em: 1 mar. 2022.

JUNIOR, V. M. C. **Caracterização da capacidade operacional de pulverizadores de barras no Brasil dos anos de 2008 a 2018. 2020.** Dissertação (Mestrado) – UNESP, Botucatu, 2020. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/handle/11449/192576. Acesso em: 31 maio 2025.

JUNIOR, A. F. et al. Avaliação do rendimento de máquinas agrícolas em diferentes condições operacionais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v. 17, n. 1, p. 95-102, 2013.

MACHADO, T. M.; QUEIROZ, D. G. B.; REYNALDO, E. F. Desempenho operacional de pulverizador autopropelido de barras no município de Sinop – MT. **Enciclopédia Biosfera,** Goiânia, v. 11, n. 22, p. 875-887, 2015.

MÜLLER, F. **Pulverização, tecnologia e meio ambiente.** 2021. Disponível em: https://gestagro360.com.br/2021/07/22/artigo-pulverizacao-tecnologia-e-meio-ambiente/. Acesso em: 20 set. 2024.

PENNACHI, J. P. **Drone para pulverização**: quando a tecnologia vale a pena? 2023. Disponível em: https://blog.aegro.com.br/drone-para-pulverizacao/. Acesso em: 2 jun. 2025.

RICHEY, C. B. **Agricultural Engineers' Handbook.** New York: McGraw-Hill, 1961.

ROSA, F. A.; LAZARRI, F.; TRES, L. Tecnologias de drones para pulverização agrícola: avanços e desafios. **Revista de Ciências Agrárias,** v. 45, n. 2, p. 150-160, 2022.

ISBN 978-65-990392-6-3

R CORE TEAM. **R:** A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: https://www.R-project.org/.

SANTOS, H. G. dos et al. **Brazilian Soil Classification System**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, M. L.; GOEDEL, F**. Desenvolvimento de mecanismo de abertura horizontal para barras de pulverização de um autopropelido**. 2022. Disponível em: http://repositorio.upf.br/bitstream/riupf/2262/1/PF2022Maria%20Luiza%20dos%20Santos.pdf. Acesso em: 1 jun. 2025.

SANTOS, R. C. Rendimento de distribuidores autopropelidos em diferentes velocidades de deslocamento. **Revista Agropecuária Técnica,** v. 43, n. 1, p. 22-30, 2022.

SANTOS, L. R. dos. **Desempenho operacional de pulverizadores autopropelidos na agricultura de precisão**. 2022. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2022. Disponível em: https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/UPF_b773253439c737b4dd21bdf831374b1c. Acesso em: 10 set. 2025.

SILVEIRA, R. L. L.; FILHO, H. M. Tecnologia e inovação na agricultura: uma análise microeconômica. **Revista de Economia e Sociologia Rural,** v. 50, n. 3, p. 451-468, 2012.

ZHANG, D. et al. Current progress and future prospects of agricultural spraying with UAVs. **Drones**, Basel, v. 8, n. 11, p. 686, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/drones8110686.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 78

QUANTIFICAÇÃO DO FLUXO DE FERTILIZANTES SÓLIDOS COM O USO DE UM SENSOR NÃO INTRUSIVO

Quantification of Solid Fertilizer Flow Using a Non-Intrusive Sensor

Rafael Sobroza Becker[1]; Airton dos Santos Alonço[2]; Tiago Rodrigo Francetto[3]

[1] Engenheiro Agrônomo, Doutor em Engenharia Agrícola, Professor na Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, rafaelsob@unisc.br
[2] Engenheiro Agrícola, Doutor em Engenharia Mecânica, Professor na Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, airtonalonco@gmail.com
[3] Engenheiro Agrícola, Doutor em Engenharia Agrícola, Professor na Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, campus Cachoeira do Sul, tiago.francetto@ufsm.br

RESUMO

A eficiência na aplicação de fertilizantes é fundamental para o sucesso da produção agrícola, sobretudo em sistemas de agricultura de precisão. A utilização de sensores não intrusivos surge como alternativa para mensurar, em tempo real, o fluxo de fertilizantes em semeadoras-adubadoras, minimizando erros de dosagem e permitindo ajustes automáticos. O objetivo deste trabalho foi validar o uso de um sensor baseado em microondas para quantificar o fluxo de massa de fertilizantes sólidos em função da granulometria e das rotações de acionamento de um dosador helicoidal. O estudo foi conduzido em bancada de ensaios, utilizando três tipos de fertilizantes minerais. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em arranjo trifatorial (método de medição, tipo de fertilizante e rotação de acionamento), com cinco repetições. Os resultados indicaram que o sensor apresentou elevada correlação com o método manual para fertilizantes granulados, mas subestimou a taxa de aplicação em 21,56% para o fertilizante farelado. Conclui-se que o sensor microondas é uma ferramenta promissora para monitoramento do fluxo mássico em semeadoras-adubadoras, com potencial aplicação em sistemas de taxa variável na agricultura de precisão.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Automação. Dosador helicoidal. Taxa variável.

ABSTRACT

Efficiency in fertilizer application is crucial for successful crop production, especially in precision agriculture systems. The use of non-intrusive sensors emerges as an alternative to measure, in real time, the fertilizer flow in planters, minimizing dosage errors and enabling automatic adjustments. The objective of this study was to validate the use of a microwave-based sensor to quantify the mass flow of solid fertilizers as a function of granulometry and dosing shaft rotation. The experiment was carried out in a test bench, using three types of mineral fertilizers. The experimental design was completely randomized, in a three-factor arrangement (measurement method, fertilizer type, and drive rotation), with five replications. Results showed that the sensor presented high correlation with manual measurement for granular fertilizers but underestimated the application rate by 21.56% for powdered fertilizer. It is concluded that the microwave sensor is a promising tool for mass flow monitoring in row crop planters, with potential application in variable rate precision agriculture systems.

Keywords: Precision agriculture. Automation. Fertilizer metering. Variable rate.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

O adequado crescimento e desenvolvimento das plantas são dependentes da absorção correta de nutrientes, resultante da disponibilidade do solo e da suplementação exata, através da aplicação de fertilizantes. Para isso, o consumo destes pode aumentar de 166 milhões de toneladas em 2005/2007 para 263 milhões de toneladas em 2050 (Alexandratos e Bruinsma, 2012). Porém, o aumento no consumo e a diminuição das reservas de matérias primas, as quais são utilizadas em sua composição, tem ocasionado um incremento dos custos de aquisição, tornando-se um importante fator na hora de tomadas de decisões no planejamento agrícola.

A Agricultura de Precisão (AP), que usa a tecnologia da informação e comunicação, permite um melhor entendimento do que pode acontecer na lavoura, utilizando dados georreferenciados (Becker *et al*., 2025). Com base na coleta e processamento dessas informações, poderá ser variada a aplicação de sementes, fertilizantes e controle de plantas daninhas e pragas. Além disso, pode ajudar a melhorar a produtividade, a rentabilidade, bem como a diminuir o impacto ambiental (Alameen *et al*., 2019; May e Kocabiyik, 2019). Porém, para uso no manejo específico do local é necessário o uso de tecnologias de aplicação a taxa variável.

Para viabilizar a taxa variável são necessários sistemas de controle, que deverão definir a posição da máquina, associá-la a uma taxa de aplicação, oriunda de mapas de prescrição ou sensores, e comandar o acionamento dos dosadores. As duas tecnologias básicas para fertilizantes são: as baseadas em mapas, onde a taxa de aplicação é de acordo com um mapa georreferenciado, que em conjunto com um receptor GPS altera a dose desejada conforme o deslocamento da adubadora (Grisso *et al*., 2011). E as baseadas em sensores, que medem as propriedades do solo ou as características da cultura e com base no fluxo contínuo de informação recebido, calcula as necessidades em tempo real por algoritmos abastecidos pelos dados dos sensores (Yuan *et al*., 2010).

Apesar disso, as semeadoras-adubadoras para plantio direto, ainda carecem de dispositivos que minimizem erros de deposição, quanto a aplicação de fertilizantes no sulco de semeadura. Estas máquinas, possuem mecanismos de dosagem de fertilizantes, compostos por dosadores de fluxo contínuo, sendo os do tipo helicoidais os mais utilizados. Contudo, poderá haver variabilidade na quantidade distribuída ao longo do tempo. Entre os principais fatores geradores de erros podem ser citados os efeitos de inclinações transversais e longitudinais de trabalho (Ferreira *et al*., 2010). Além disso, podem ocorrer variações de até 38% na taxa de aplicação em decorrência das especificidades de cada dosador, do grau de inclinação, ou devido a diferenças na formulação do fertilizante utilizado (Reynaldo e Gamero, 2015).

Logo, a inserção de sensores capazes de realizar a medição instantânea do fluxo de massa de fertilizantes após a liberação pelo dosador, poderá monitorar as taxas de fertilizantes em cada linha de semeadura, servindo como base de correção para os controladores que equipam sistemas automatizados. Com isso, a verificação e os ajustes permitem a eficácia da distribuição de fertilizantes utilizados na lavoura.

Diversas são as técnicas de mensuração de vazão mássica de sólidos, como: métodos elétricos, ressonância, atenuação e dispersão, tomografia de fluxo, imagem digital, Doppler, correlação cruzada e filtragem espacial (Zheng & Liu, 2011; Pang *et al*., 2018);

Técnicas de microondas têm sido utilizadas para medir parâmetros do fluxo de sólidos. Por ser um método não intrusivo, acaba não interferindo no fluxo dos sólidos, pois o sensor microondas é relativamente pequeno em tamanho, sendo mais fácil de instalar, ajustar e apresenta um melhor desempenho em condições adversas (poeira, luz, vibração), (Hamid and Stuchly, 1975; Pang *et al*., 2018; Zou *et al.,* 2020). A teoria de efeito doppler se caracteriza

ISBN 978-65-990392-6-3

quando a energia de microondas é refletida a partir de um objeto em movimento, resultando uma mudança de frequência do sinal, fornecendo informações sobre a velocidade do objeto em movimento (Zou *et al*., 2020).

Portanto, este estudo tem como objetivo quantificar o fluxo de massa de diferentes fertilizantes sólidos, simulando diversas taxas de aplicação, utilizando um sensor microondas de efeito Doppler.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Propriedades físicas dos sólidos.

Utilizou-se na pesquisa três sólidos do tipo fertilizantes minerais, multinutrientes, formulados a partir da mistura de três macronutrientes, Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), sendo eles: Mistura granular, 5-20-20 (Fertilizante 1), Mistura de grânulos, 5-20-20 (Fertilizante 2), Mistura farelada, 0-30-15 (Fertilizante 3).

As propriedades físicas determinadas foram: densidade aparente (razão entre a massa por unidade de volume), teor de água (quantidade de água na amostra), ângulo de repouso (indicativo de fluidez dos sólidos) e granulometria (tamanho de partículas). Estas propriedades são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise granulométrica dos fertilizantes minerais utilizados nos experimentos.

Propriedade Física	Fertilizantes		
	Mistura Granular 5-20-20	Mistura de Grânulos 5-20-20	Farelado 0-30-15
Densidade (g cm^{-3})	0,97	1,02	1,11
Teor de água (%)	1,78	4,78	3,12
Ângulo de Repouso (º)	31,01	30,47	32,15
	Porcentagem Retida na Peneira (%)		
Peneira 4.00 mm	21,69	4,05	0,00
Peneira 2.00 mm	72,92	76,54	0,27
Peneira 1.19 mm	3,01	11,27	1,25
Peneira 1.00 mm	0,68	1,73	3,11
Peneira 0.84 mm	0,41	0,91	2,47
Peneira 0.50 mm	0,72	2,60	25,08
0	0,57	2,90	67,83
Total	100	100	100

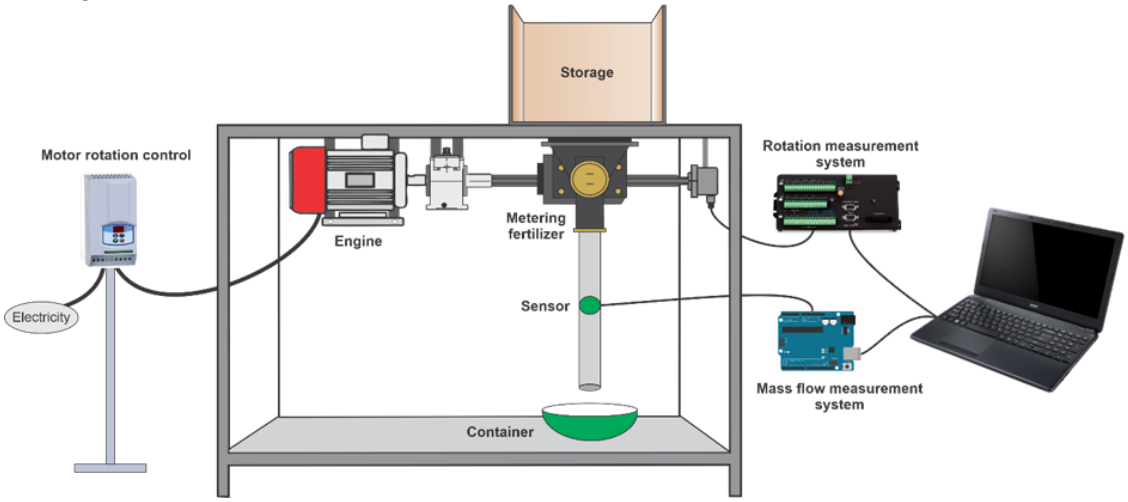
Fonte: Autor (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

2.2 Bancada de testes

Para a pesquisa utilizou-se uma bancada para testes e ensaios com dosadores de fertilizantes, que reproduz condições de trabalho de semeadoras-adubadoras a campo (Figura 1). Os sólidos ficaram armazenados no reservatório, mantido com 50% de sua capacidade, sobre o mecanismo dosador do tipo helicoidal (sem-fim), equipado por helicóide com passo de 25,4 mm, para proporcionar as taxas de aplicações de referência. O acionamento do dosador, foi realizado por um motor elétrico de 0,735 kW, acoplado a um redutor, com relação de transmissão de 10:1, sendo a alteração das taxas de aplicação deu-se pela modificação das velocidades angulares de acionamento, através de um conversor de frequência.

Figura 1 - Bancada utilizada para estimativa do fluxo de massa de fertilizantes.



Fonte: Autor (2025)

A determinação da taxa de aplicação, g min^{-1}, foi realizada pela mensuração da massa de fertilizantes coletada, após estabilização do sistema dosador. A estimativa do fluxo de massa pelo sensor microondas foi validada e calibrada através dos testes estáticos, realizados por meio de medição manual, consistindo na coleta dos sólidos após a liberação pelo dosador, em um recipiente, no tempo de 30 segundos, verificado por cronômetro digital. Para a mensuração da massa de sólidos coletada utilizou-se uma balança digital, com precisão decimal.

Para aquisição, gerenciamento e armazenamento dos dados de rotação do mecanismo dosador, empregou-se um módulo de medição e controle (datalogger), conectado a um sensor de rotação do tipo encoder incremental, com taxa de aquisição de dados de 10 Hz. Este sensor, foi instalado no eixo final que movimenta o mecanismo, a fim de coletar com precisão a rotação do mesmo. Com isso, foram selecionadas dez rotações de acionamento do dosador, que são: 11,03; 22,25; 32,14; 41,98; 51,76; 61,61; 71,53; 81,38; 91,31 e 101,33 rpm.

Na medição de fluxo de massa, foi utilizado um sensor microondas com a tecnologia de radar por efeito Doppler, sendo capaz de detectar corpos dentro do seu raio de ação. Além disso, evitando a influência de movimentos externos, fixou-se o sensor no interior de um tubo condutor em aço inox, com dimensões de 600 mm de comprimento, 50 mm de diâmetro e espessura da chapa de 1 mm.

Para funcionamento do sensor, empregou-se como microcontrolador uma placa de prototipagem Arduino UNO, para a alimentação com energia externa foi usado um cabo USB, tendo em vista que esse componente já realiza a transmissão de dados entre a placa e o computador.

ISBN 978-65-990392-6-3

O desenvolvimento da programação do software foi feito por meio do ambiente integrado de desenvolvimento (IDE – *Integrated Development Environmnet*) do próprio Arduino, realizada em linguagem "C/C++" e realizado o *upload* do código para a placa através do cabo USB. A condução do sinal do sensor para a placa de prototipagem, foi através de jumpers.

O sistema permitiu a coleta de 4096 dados de variação de tensão no intervalo de 30 segundos. Para a parametrização da estimava, transformou-se os valores de tensão no instante de tempo, em frequência (Hertz). Desta forma empregou-se uma análise espectral para estudar o comportamento destes sinais no domínio da frequência, através da Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Desta forma estimou-se a velocidade das partículas, pela contagem do número de ciclos do sinal Doppler em um segundo (Equação 1).

$$v = \left(\frac{c}{2f\ \cos\theta}\right) * f_d \quad (1)$$

Onde:

v – velocidade do alvo (m s^{-1});

c – velocidade da luz (m s^{-1});

f – frequência do transmissor de radar doppler (Hz);

θ – ângulo de visão da antena;

f_d – frequência doppler (Hz).

Para determinar o fluxo mássico de fertilizantes no sistema de dosagem, adotou-se um modelo baseado no princípio da conservação da massa, no qual o escoamento de partículas sólidas é descrito em função de suas propriedades físicas e da geometria do tubo. Essa abordagem permite relacionar a densidade aparente do material, a área de passagem e a velocidade média das partículas, resultando no cálculo do fluxo mássico instantâneo (Equação 2), utilizado como referência para calibração do dosador e posterior ajuste da taxa de aplicação.

$$Q = \rho_a * A * v \quad (2)$$

Onde:

Q – Fluxo mássico dos sólidos (kg s^{-1});

ρ_a – Densidade aparente de partículas (kg m^3);

A – Área da seção transversal do tubo (m^2);

v – Velocidade média das partículas (m s^{-1}).

Para avaliar a precisão do sistema de monitoramento, calcularam-se as diferenças absolutas entre as taxas medidas pelo sensor e as obtidas manualmente (Equação 3). Essa comparação quantifica o desvio ponto a ponto e permite verificar a exatidão do sensor. Valores próximos de zero indicam boa calibração e uniformidade de aplicação.

$$DA_i = TS_i - TM_i \quad (3)$$

Onde:

DA_i – Diferença absoluta (g $30s^1$);

ISBN 978-65-990392-6-3

TS_i – Taxa de fertilizantes obtida pelo sensor (g 30s^{-1});

TM_i – Taxa de fertilizantes obtida manualmente (g 30s^{-1})

Para a calibração dos dados coletados, foi proposto um Fator de Correção (Fc), Equação 4, levando em consideração a equação de calibração obtida através da análise de regressão dividida pelo fluxo estimado no sistema de aquisição de dados.

$$Fc = \frac{(Ec)}{Q} \quad (4)$$

Onde:

Fc – Fator de correção;

Ec – Equação de calibração;

Q – Fluxo mássico dos sólidos (g 30 s^{-1});

De posse dos dados de fluxo mássico dos fertilizantes coletados com o sensor e do fator de calibração proposto, podemos estimar o fluxo de massa dos fertilizantes sólidos por meio do uso do sensor microondas, através da Equação 5.

$$Q' = Q * Fc \quad (5)$$

Onde:

Q' – Fluxo mássico de aplicação dos fertilizantes corrigido (g 30s^{-1});

Q – Fluxo mássico de aplicação dos fertilizantes sensor (g 30s^{-1});

Fc – Fator de correção.

Os dados foram submetidos ao teste de Kolmogorov-Smirnov para verificar a normalidade dos erros e ao teste Cochran para testar a homogeneidade. Também foram submetidos a análise estatística de variância (ANOVA) e verificado a significância dos fatores através do teste F. Para a interpretação de tratamentos não ordenados por critérios numéricos (qualitativos), procedeu-se a comparação múltipla de médias com o teste de análise de Scott-Knott, em nível de 5% de probabilidade de erro. Já para os tratamentos de valores ordenáveis (quantitativos) foi realizada a análise de regressão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

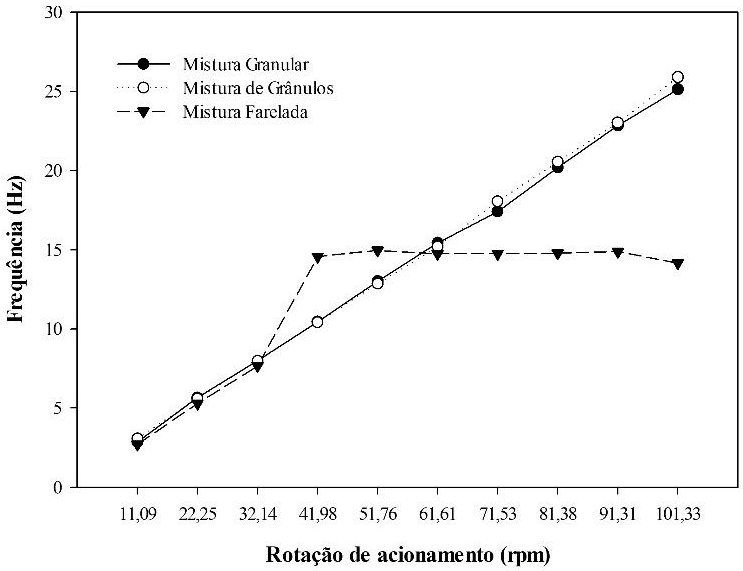
3.1 Calibração

A coleta dos 4096 dados em 30 segundos com as modificações de rotações e fertilizantes indicam após a transformação, unidades de frequência, Figura 2.

Para as misturas granulares e de grânulos, é possível notar um ajuste linear, evidenciando que com o aumento da rotação de acionamento do dosador, consequentemente na taxa de aplicação, ocorre a aquisição proporcional da frequência observada. Esse fato evidencia que o sensor permite a identificaro incremento das velocidades das partículas, em decorrência pode-se estimar a taxa de aplicação. Corroboram Hamid e Stuchly (1975) ao mencionarem a possibilidade de estimar a velocidade de partículas pelo método microondas.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2 - Análise da frequência obtida com a alteração da rotação de acionamento.



Fonte: Autor (2025)

Entretanto, para o fertilizante do tipo mistura farelada é possível observar a linearidade dos resultados até a rotação de 32,14 rpm, sendo que após se verifica um amplo incremento na frequência que se mantém até a maior rotação estudada. Esse caso incidiu, pois, as oscilações dos dados de tensão ocorreram de forma cíclica, mas com maior amplitude, alternando entre os valores de 0 a 800.

A ampliação do fluxo mássico sólido causa dois efeitos antagônicos na medição. Por um lado, os valores de tensão aumentam com o acréscimo da taxa de fluxo dos fertilizantes, pois um maior número de microondas é refletida pelas partículas. Por outro lado, quanto maior for a concentração destes sólidos, a maioria destas microondas serão refletidas pelas partículas próximas ao sensor, de modo a dificultar a detecção com precisão das partículas distantes do sensor.

De acordo com Pang *et al*. (2018), este efeito é conhecido como "blindagem" o que causará influência negativa na medição. Portanto, é necessário determinar uma faixa de mensuração adequada antes de aplicar o método de medição por microondas. Para os autores o ponto limite de medição da vazão mássica dos sólidos areia de quartzo, carbonato de cálcio e óxido de alumínio é de 1,1 kg s^{-1}. Quando a vazão mássica sólida é maior que esse valor, o método de medição por microondas não é mais aplicável.

Deste modo, para a mistura farelada a medição é limitada até a rotação de 32,14 rpm, pois, este fertilizante apresenta os menores índices granulométricos, ou seja, possuem partículas de menor tamanho, se comparado aos demais, o qual irá influenciar diretamente no efeito de blindagem na medição do sensor.

Contudo, após a análise inicial dos dados de frequência, estimativa da velocidade e a estimativa do fluxo mássico dos sólidos, observa-se que para todos os fertilizantes ocorreu uma superestimativa dos dados de fluxo de massa. Assim, foi proposto a inserção de um fator de correção que leva em consideração a rotação de acionamento, conforme Tabela 2. Para o fertilizante farelado o fator foi aplicado para as três primeiras rotações de acionamento, nas demais não incidiram correções.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 2. Funções matemáticas de calibração para cada tipo de fertilizante.

Fertilizantes	**Função matemática de calibração (*Ec*)**	**Coeficiente de determinação R^2**
Mistura Granular	y = 8,6291 x – 27,776	99,81%
Mistura de Grânulos	y = 10,719 x – 40,191	99,72%
Mistura Farelada	y = 16,986 x – 18,908	99,98%

Fonte: Autor (2025)

3.2 Estimativa do Fluxo de Massa

A análise de variância (ANOVA) da variável taxa de aplicação, com sua respectiva média, níveis e resultados do teste F, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Síntese da análise de variância com as médias dos fatores, seus níveis e os resultados do teste F.

Fatores	**Variável**
	Fluxo de mássico (g $30s^{-1}$)
MÉTODO DE MEDIÇÃO	
Manual (Mm)	684,48 b
Sensor (Ms)	612,08 a
TIPO DE FERTILIZANTE	
Mistura Granular	461,90 a
Mistura de Grânulos	567,94 b
Mistura Farelada	915,00 c
ROTAÇÃO DE ACIONAMENTO	
11,09 rpm (R1)	123,33 a
22,25 rpm (R2)	246,76 b
32,14 rpm (R3)	363,33 c
41,98 rpm (R4)	530,73 d
51,76 rpm (R5)	638,03 e
61,61 rpm (R6)	721,86 f
71,53 rpm (R7)	817,46 g
81,38 rpm (R8)	915,66 h
91,31 rpm (R9)	1016,23 i
101,33 rpm (R10)	1109,36 j

ISBN 978-65-990392-6-3

CV e MG	
CV (%)	2,54
Média Geral (MG)	648,28
TESTE F	
Método de Medição (F1)	1446,55*
Tipo de Fertilizante (F2)	26666,53*
Rotação de acionamento (F3)	12086,42*
F1 x F2	1525,93*
F1 x F3	430,91*
F2 x F3	317,26*
F1 x F2 x F3	400,76*

Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem significativamente entre si no teste de Scott-Knott ($p<0,05$). *: Significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p<0,05$). Fonte: Autor (2025).

Todos os fatores em estudo apresentaram influência significativa para a variável fluxo mássico, ao nível de 5% de probabilidade. Além disso, ocorreu efeito significativo para a interação entre todos os fatores, ou seja, o efeito ou mudança em um destes irá influenciar significativamente em outro. O coeficiente de variação obtido foi de 2,54 %, podendo indicar uma baixa magnitude (CV < 10%), de acordo com o critério estabelecido por Gomes (1990). Aferindo uma alta precisão experimental na obtenção da variável resposta.

O uso do sensor subestimou a média da taxa de aplicação em 10,57 % (72,4 g 30 s^{-1}) em comparação ao método manual. Contudo, vale ressaltar que na média geral estão incluídos os valores não calibrados para o fertilizante farelado.

Ao analisar o fator tipo de fertilizante, observou-se diferença estatística entre os três fertilizantes testados. Verificou-se que, para uma mesma regulagem, quanto maior a densidade do fertilizante, maior será o seu fluxo mássico, resultando em um acréscimo de até 49,52 % no caso do fertilizante granular em relação ao farelado. Além disso, é importante notar que a amplitude da taxa de aplicação do fertilizante mistura de grânulos para a mistura granular pode ter sofrido influência positiva, devido ao teor de água presente nos mesmos, à proporção de 4,78 e 1,78 %, respectivamente.

A densidade é a relação da massa de um material com o volume que este ocupa. Esta característica é importante para determinação da capacidade de vazão dos dosadores (RODELLA e ALCARDE, 2000). Além disso, pode ocorrer a segregação do material sendo entendida como a separação dos grânulos componentes de uma mistura. As partículas mais finas e densas vão para o fundo do reservatório e são distribuídas primeiro, o que pode ocasionar uma variação na composição e na quantidade a ser aplicada (SILVEIRA, 1989).

A taxa de aplicação média foi diretamente proporcional a rotação de acionamento. Com isso, verificamos que a rotação é o principal fator de regulagem de fluxo de fertilizantes em mecanismos dosadores helicoidais, corroborando com os resultados de Garcia *et al*. (2006) e Lassen *et al*. (2010), onde indicam que a vazão é determinada pela velocidade de acionamento, possuindo correlação linear.

Com isso, modelos matemáticos foram propostos para desenvolver estratégias no desenvolvimento de sistemas de controle eletrônicos para reduzirem a imprecisão da dosagem

ISBN 978-65-990392-6-3

de fertilizantes, onde a correção da taxa de aplicação é realizada por meio da rotação de acionamento (FRANCK *et al.*, 2015; GARCIA *et al.*, 2012).

Com a interação significativa entre os fatores é necessário analisar a influência mútua entre os mesmos (Tabela 4).

Tabela 4. Desdobramento das médias entre os fatores método de medição (F1) e tipo de fertilizante (F2).

Taxa de aplicação (g $30s^{-1}$)		
Tipo de Fertilizante (F2)	Método de Medição (F1)	
	Método Manual	Método Sensor
Mistura Granular	460,96 Aa	462,84 Aa
Mistura de Grânulos	566,92 Ba	568,96 Ba
Mistura Farelada	1025,56 Cb	804,44 Ca

Nota: Médias seguidas de mesma letra na minúscula linha e maiúscula na coluna, não diferem pelo teste de Scott-Knott, considerando o valor nominal de 5% de significância. Fonte: Autor (2025).

Não ocorreu diferenciação entre os métodos de medição quando utilizados os fertilizantes do tipo mistura granular e mistura de grânulos e farelada, evidenciando que o uso de sensor é eficiente para mensurar o fluxo de massa dos fertilizantes.

Logo para a mistura farelada o sensor subestimou a taxa de aplicação em 21,56 %, evidenciando a dificuldade do mesmo em estimar com precisão materiais mais densos e com menores tamanhos de partículas.

Também é possível verificar a significância estatística entre todos os fertilizantes utilizados, tanto para o método manual como para o sensor. Isso comprova que é extremamente necessário o desenvolvimento de sistemas que possibilitem a estimativa da taxa de aplicação para corrigir a rotina dos atuadores, uma vez que a alteração manual da regulagem das semeadoras-adubadoras para cada diferença granulométrica do insumo, torna o processo inviável no contexto da aplicação a taxa variável.

Schneider *et al*. (2005) verificaram que a aplicação de fertilizante ocorre de maneira imprecisa. Em seu estudo os autores utilizaram diversos tipos de fertilizantes, com diferentes propriedades físicas e observaram que a taxa de aplicação depende do tipo de fertilizante utilizado, sendo a mesma influenciada pela diferença das propriedades físicas do fertilizante, incidindo a necessidade de se regular o sistema dosador conforme a formulação usada.

Na Figura 3 é mostrada a análise de regressão entre a interação dos fatores rotação e método de medição.

É possível verificar que o aumento na rotação promove um incremento no desvio da taxa de aplicação estimada pelo sensor, pois para o fertilizante farelado não foi possível realizar uma estimativa adequada acima da rotação de 32,14 rpm.

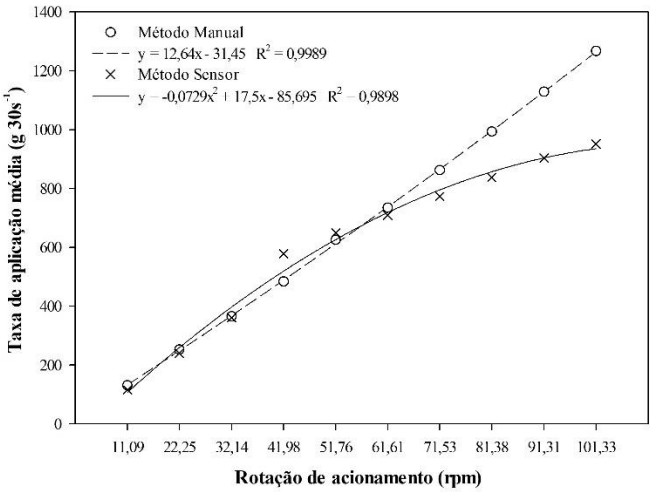
Já a análise de regressão do fator rotação dentro de cada tipo de fertilizante pode ser visualizada na Figura 4.

É possível observar aspectos importantes que ocorrem na medição do fertilizante farelado, sendo o primeiro relacionado a magnitude da taxa de aplicação em relação aos demais fertilizantes para as mesmas rotações . Como exemplo, observa-se que na rotação de 41,98 rpm para o fertilizante farelado a taxa é maior que na rotação de 101,33 rpm para o fertilizante granular. Este fato ocorre, pois, a densidade dos fertilizantes é diferenciada na

ISBN 978-65-990392-6-3

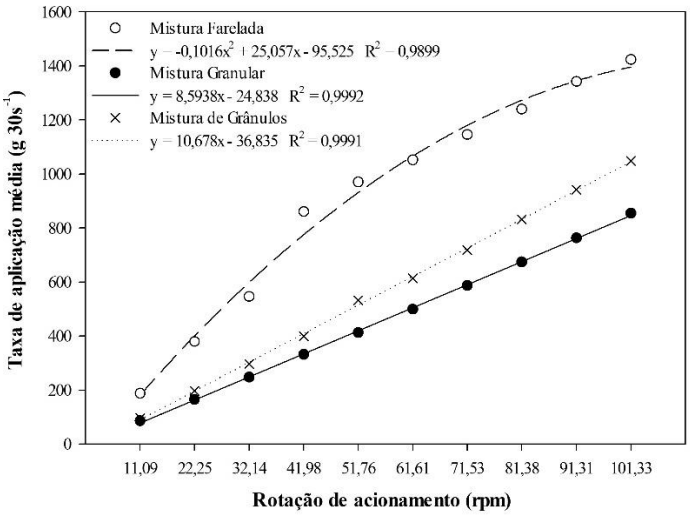
ordem de 1,11 e 0,97 g cm^3, respectivamente. Também, o menor tamanho das partículas do fertilizante farelado atrelada a alta taxa de aplicação promovem a limitação do sensor em estimar com precisão o fluxo mássico.

Figura 3 – Regressões do fator rotação de acionamento dentro de cada nível do fator método de medição para todos os fertilizantes.



Fonte: Autor (2025)

Figura 4 – Regressões do fator rotação de acionamento dentro de cada nível do fator tipo de fertilizante.



Fonte: Autor (2025)

Yan (1996) descreve que alguns fatores afetam diretamente na estimativa de fluxo de partículas por sensores, que são: distribuição não homogênea dos sólidos, velocidades irregulares, tamanho variável de partículas. Além disso, o autor salienta que esses sensores devem ser insensíveis a umidade do material analisado.

Também, buscando evidenciar detalhadamente a eficiência do sensor microondas na estimativa do fluxo mássico, foram realizadas análises das diferenças absolutas (g $30s^{-1}$), conforme Tabela 5 e Figura 5.

ISBN 978-65-990392-6-3

Tabela 5 – Diferença absoluta da taxa de aplicação obtida entre o método manual e o uso do sensor microondas.

Rotação (rpm)	Diferença Absoluta (g $30s^{-1}$)		
	Mistura Granular	Mistura de Grânulos	Mistura Farelada
11,09	-6,65	-4,06	-36,39
22,25	0,30	3,38	-40,57
32,14	4,88	16,73	-34,44
41,98	6,08	20,46	258,47
51,76	14,27	-32,69	92,56
61,61	10,29	13,61	-101,58
71,53	-6,49	14,55	-288,31
81,38	4,10	-0,44	-471,80
91,31	-6,49	-6,33	-662,40
101,33	-14,15	-5,45	-925,65

Fonte: Autor (2025)

O erro médio entre os métodos de medição para todas as rotações de acionamento foi de 1,91, 1,98 e -221,01 g $30s^{-1}$ para os fertilizantes mistura granular, mistura de grânulos e mistura farelada, respectivamente. Com isso, considera-se que para os fertilizantes granular e mistura de grânulos o uso do sensor e a proposta de calibração foi adequada, havendo uma pequena superestimativa do fluxo mássico. Pernirschke *et al*. (2009) ao desenvolver um sistema com a utilização do método Doppler e estimando a velocidade das partículas, obtiveram um erro inferior a 10%.

Pang *et al*. (2018) ao desenvolverem um sistema baseado na teoria microondas e efeito doppler para medir a taxa de fluxo de massa sólida de partículas de areia de quartzo, carbonato de cálcio e óxido de alumínio, encontraram um desvio médio relativo de 7,73 %, indicando que a proposta de calibração também foi de acordo com os dados.

Os fertilizantes do tipo mistura granular e de grânulos apresentaram uma correlação positiva entre os métodos, desde que empregado o uso do fator de correção.

Na Figura 5 é possível visualizar a correlação entre os métodos de medição para todos os tipos de fertilizantes.

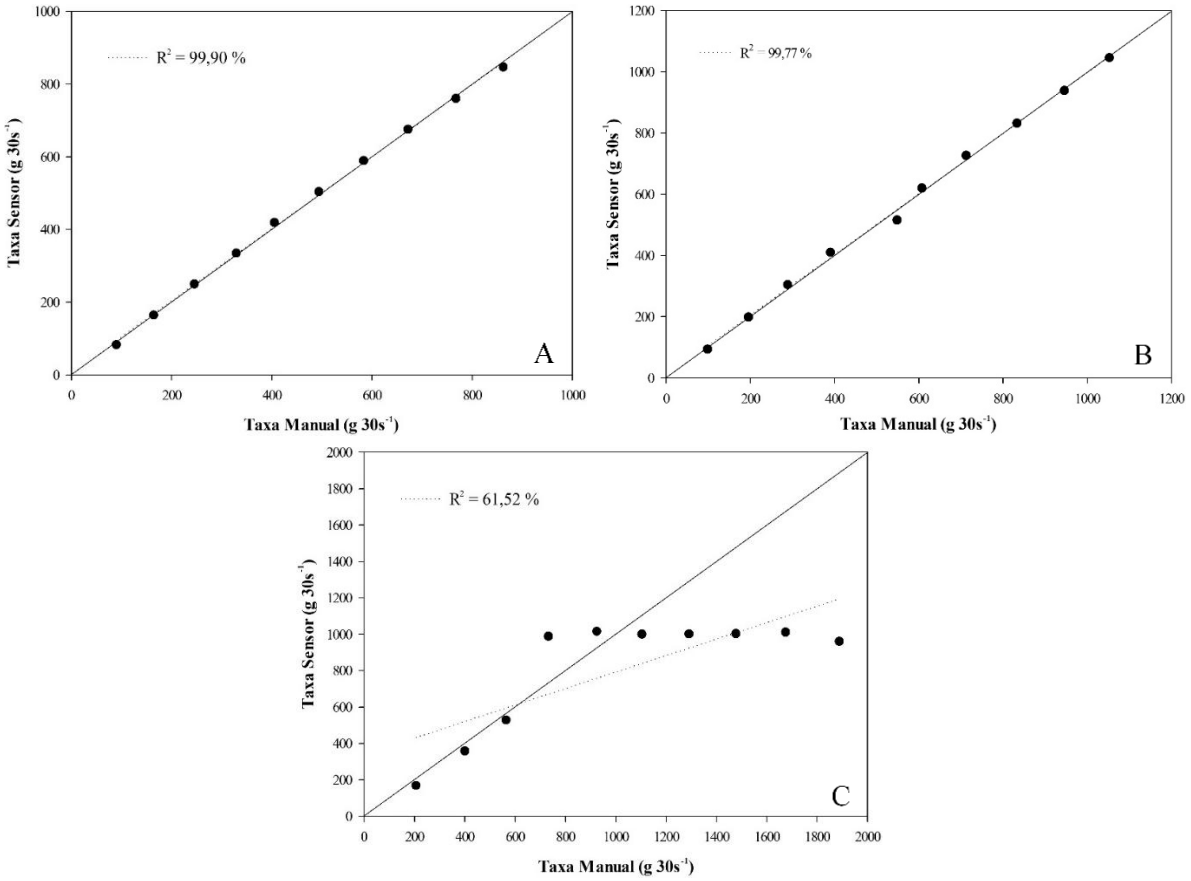
Foi possível constatar a maior precisão do sensor microondas na estimativa do fluxo mássico para o fertilizante mistura granular, pois o mesmo possui uma melhor uniformidade e maior tamanho de grânulos, apresentando 94,61% das partículas retidas nas peneiras com tamanho de 4 e 2 mm. Já para a mistura de grânulos estes índices são reduzidos para 80,59 %, constatando a presença de partículas fareladas e pó em sua composição o que dificulta a medição do sensor pelo efeito de blindagem das partículas.

Esse efeito foi confirmado com o uso do fertilizante farelado que apresenta 92,91 % de suas partículas menores que 0,5 mm, o qual impedem a eficiência do sensor nas maiores taxas de aplicação. Contudo, para o fertilizante mistura farelada o baixo coeficiente de determinação obtido foi devido à dificuldade do sensor em mensurar taxas aplicadas nas rotações acima de

ISBN 978-65-990392-6-3

32,14 rpm. No entanto, ao realizar a adequação da função matemática para esse fertilizante nas três primeiras rotações obtêm-se um coeficiente de determinação de 99,90 %.

Figura **5** – Correlação entre o método manual e o sensor microondas para todos os tipos de fertilizantes.



Nota: (A) Fertilizante mistura granular, (B) fertilizante mistura de grânulos, (C) Fertilizante mistura farelada. Fonte: Autor (2025).

4 CONCLUSÃO

O fluxo mássico de fertilizantes sólidos pode ser mensurado através do uso de sensor de ondas eletromagnéticas do espectro microondas que utiliza o princípio de radar doppler. A estimativa da taxa de aplicação de fertilizantes é influenciada pela granulometria dos materiais utilizados.

Existem muitas direções para estudos futuros, mas algumas particularmente promissoras. A primeira é usar os resultados do melhor algoritmo aqui avaliado para desenvolver um sistema inteligente, que pudesse ser embarcado em semeadoras-adubadoras e, durante a operação, ser capaz de estimar o fluxo mássico de fertilizantes em tempo real.

O uso do sensor microondas foi eficiente para mensurar o fluxo mássico de fertilizantes sólidos do tipo mistura granular e mistura de grânulos. Para o fertilizante farelado, a medição foi limitada até a rotação de 32,14 rpm, com subestimativa média de -37,13 g $30s^{-1}$.

Foi possível desenvolver uma equação matemática de primeiro grau que relaciona os valores proporcionais da frequência do inversor com as rotações de acionamento do dosador, bem como determinar um fator de correção considerando todas as rotações de acionamento para os fertilizantes do tipo mistura granular e grânulos, e apenas as três primeiras velocidades angulares para o fertilizante farelado.

ISBN 978-65-990392-6-3

REFERÊNCIAS

ALAMEEN, A. A.; AL-GAADI, K. A.; TOLA, E. K. Development and performance evaluation of a control system for variable rate granular fertilizer application. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, p. 505-517, 2019.

ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. **World Agriculture towards 2030/2050: The 2013 Revision**, ESA Working. p. 12-03, FAO, Rome, 2013.

BECKER, R. S.; FRANCETTO, T. R.; SILVA, R. P. da. Ecossistemas de gestão de dados em máquinas agrícolas. In: SILVA, R. P. da; FRANCETTO, T. R. (org.). **Manual de Máquinas Agrícolas – Volume II**. 1. ed. Jaboticabal: Fundação de Apoio à Pesquisa, Ensino e Extensão – Funep, 2025. p. 429-480. ISBN 978-65-5671-072-3.

FERREIRA, M. F. P.; DIAS, V. de O.; OLIVEIRA, A.; ALONÇO, A. dos S.; BAUMHARDT, U. B. Uniformidade de vazão de fertilizantes por dosadores helicoidais em função do nivelamento longitudinal. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 18, n. 4, p. 297-304, jul./ago. 2010.

FRANCK, C. J.; ALONÇO, A. dos S.; MACHADO, O. da C.; FRANCETTO, T. R.; CARPES, D. P; BELLÉ, M. P. Modelos estatísticos para seleção de dosadores helicoidais com diferentes dispositivos de descarga de fertilizante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.19, n.5, p. 512–518, 2015.

GARCIA, A. P.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Auger-type granular fertylizer distributor: matemathical model and dynamic simulation. **Engenharia Agrícola**, v.32, p.151-163, 2012.

GARCIA, A. P.; UMEZU, C. K.; CAPPELLI, N. L.; RUSSO, E. Caracterização de um mecanismo dosador helicoidal de fertilizantes sólidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35. João Pessoa: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola – SBEA, ago, CD-ROM. 2006.

GOMES, F. P. Curso de estatística experimental. 13.ed. Piracicaba: Nobel, 468p. 1990.

GRISSO, R.; ALLEY, M.; THOMASON, W.; HOLSHOUSER, D.; ROBERSON, G. T. Precision farming tools - Variable-Rate Application (VRA). **VCE Publication**. p. 442-505, 2011.

HAMID, A.; STUCHLY, S. S. Microwave Doppler-Effect Flow Monitor. **IEEE transactions on industrial electronics and control instrumentation**, v. IECI-22, n.2, p. 224-228, may, 1975.

LASSEN, P.; BONOTTO, G. J.; RIST, G. P.; SILVEIRA, H. T. da ; BAUMHARDT, U. B.; RIES, B.; CARDINAL, K. M. Determinação da vazão de um dosador de fertilizantes em função da velocidade de acionamento. In: XIV Simpósio de ensino, pesquisa e extensão. SEPE, Unifra, Santa Maria, RS, nov. 2010.

MAY, S.; KOCABIYIK, H. Design and development of an electronic drive and control system for micro-granular fertilizer metering unit. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, p. 556-566, 2019.

ISBN 978-65-990392-6-3

PANG, L.; SHAO, Y.; GENG, C.; ZHONG, W.; LIU, G.; LIU, L.; TIAN, W.; Measurement of solid mass flow rate by a non-intrusive microwave method. **Powder Technology**. v. 323, p. 525-532, 2018.

PERNIRSCHKE, A.; PUENTES, M.; MAUNE, H.; SCHÜBLER, M; GAEBLER, A.; JAKOBY, R. Microwave Mass Flow Meter for Pneumatic Conveyed Particulate Solids. **International Instrumetation and Measurement**. Singapore, may. 2009.

REYNALDO, E. F.; GAMERO, C. A. Avaliação de mecanismos dosadores de fertilizantes helicoidais em ângulo de nivelamento longitudinal e transversal. **Energia na agricultura**, Botucatu, v.30, p.125-136. 2015.

RODELLA, A. A.; ALCARDE, J. C. Requisitos de qualidade física e química de fertilizantes minerais. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, p. 59-78, 2000.

SCHNEIDER, P. A.; FEY, E.; ORLANDO, A. F.; PIVETTA, L. A.; FURLAN, F.; DALLABRIDA, W. R. Distribuição de adubos de diferentes fórmulas em mecanismos dosadores de semeadoras-adubadoras. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 34. Canoas: ULBRA, jul. 2005.

SILVEIRA, G. M. As Máquinas para Plantar: aplicadores, distribuidoras, semeadoras, plantadoras e cultivadoras. 1 ed., Rio de Janeiro: Globo, 1989.

YAN, Y. Mass flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines. Measurement Science and Technology. **IOP Publishing**, v. 7, n. 12, p. 1687, 1996.

YUAN, J.; LIU, C. L.; LI, Y. M.; ZENG, Q.; ZHA, X. F. Gaussian processes based bivariate control parameters optimization of variable-rate granular fertilizer applicator. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.70, p.33-41, 2010.

ZHENG, Y.; LIU Q. Review of techniques for the mass flow rate measurement of neumatically conveyed solids. **Measurement**. v. 44, n. 4, p. 589-604, 2011.

ZOU, J.; LIU, C.; WANG, H.; WU, Z. P. Mass flow rate measurement of bulk solids based on microwave tomography and microwave Doppler methods. **Powder Technology**. v. 360, p. 112-119, 2020.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 79

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE SÓLIDOS COM DRONE EM DIFERENTES ALTURAS E VELOCIDADES DE VOO

Evaluation of solids application with drone at different flight heights and speeds

Vanessa Pereira de Freitas Silva[1]; João Gabriel Fortes Peixoto[1]; Raissa Wolffenbüttel[1]; Érika Batista Feron[1]; Richard Massirer Prochnow[1]; Wellington da Silva[1] Eduardo Leonel Bottega[2]; Alberto Eduardo Knies[3]

[1] Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs), Rua Sete de Setembro, nº. 1040, Centro, CEP 96508-010, Cachoeira do Sul - RS, Brasil, e-mail para contato <vanessa-ferreira@uergs.edu.br>.

[2] Eng. Agr., Me. e Dr. em Eng. Agrícola, prof. Adjunto da UFSM Campus Cachoeira do Sul - RS, <eduardo.bottega@ufsm.br>.

[3] Eng. Agr., Me. em Ciência do Solo, Dr. em Eng. Agrícola, prof. Adjunto da Uergs Unidade em Cachoeira do Sul - RS, <alberto-knies@uergs.edu.br>.

RESUMO

O uso de drones na agricultura tem aumentado, especialmente na agricultura de precisão, possibilitando aplicações de sólidos e pulverizações. Este trabalho teve por objetivo determinar a altura e a velocidade de voo que resultam na melhor aplicação de ureia granulada. Foi realizado um experimento na Estação Agronômica da Uergs em Cachoeira do Sul-RS com um drone modelo XAG P100 voando em 3 alturas (6,0; 8,0 e 10,0 m) e 3 velocidades (4,0, 6,0 e 8,0 m s^{-1}), coletando-se os grânulos de ureia em bandejas padronizadas em uma faixa de 10 m de largura, objetivando-se uma aplicação de 50 Kg.ha^{-1}. A altura de voo de 8,0 m e velocidade de 6,0 m.s^{-1}, seguida por, 6,0 m de altura e 4,0 m.s^{-1} resultaram na aplicação da dosagem média mais próxima da preconizada. Assim, fica evidente a necessidade de calibração prévia do equipamento, para otimizar o uso de insumos, minimizar o desperdício de recursos e impactos ambientais.

Palavras-chave: Aeronave Remotamente Pilotada; Agricultura de Precisão; Ureia.

ABSTRACT

The use of drones in agriculture has been increasing, especially in precision agriculture, enabling solid and spray applications. This study aimed to determine the height and flight speed that result in the best application of granulated urea. An experiment was conducted at the Uergs Agronomic Station in Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul, using an XAG P100 drone flying at three altitudes (6.0, 8.0, and 10.0 m) and three speeds (4.0, 6.0, and 8.0 m s^{-1}). The urea granules were collected in standardized trays over a 10 m wide strip, aiming for an application rate of 50 kg.ha^{-1}. A flight height of 8.0 m and a speed of 6.0 m.s^{-1}, followed by a flight height of 6.0 m and a speed of 4.0 m.s^{-1}, resulted in the application of the average dose closest to that recommended. Therefore, the need for prior equipment calibration is evident to optimize input usage, minimize resource waste, and minimize environmental impacts.

Keywords: Unmanned aerial vehicle; UAV; Urea.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

Quando paramos para analisar a evolução da tecnologia na agricultura percebemos que antes as maneiras de cultivo eram rudimentares, o trabalho era braçal, existia uma carência de maquinário especializado e muitos agricultores nem se imaginavam utilizando qualquer tipo de tecnologia. Segundo Oliveira et al. (2020), a agricultura teve melhoria e desenvolvimento no século XX, quando a chamada Agricultura 1.0, que utilizava a tração de animais para diversas atividades. Oliveira et al. (2020) ainda afirmam que algum tempo depois, nasceu a Agricultura 3.0 e atualmente, a chamada Agricultura 4.0 que está bastante difundida e inclui conectividade e automação no uso de máquinas, veículos, drones e robôs.

De acordo com Péra e Paiva (2023), nas décadas de 1970 a 1990, a indústria agrícola brasileira recebeu um grande impulso. O Brasil era visto como protagonista na agricultura tropical, o que aumentou sua competitividade no mercado. Estima-se que a população do Brasil poderá crescer 30% nos próximos dez anos, enquanto a produção agrícola aumentará sua produtividade em 60% até 2050 e, assim, concretizando o país como um dos mais importantes produtores de alimentos do mundo.

Devido este crescimento da população e da produção agrícola mundial, toda a tecnologia e avanço de pesquisas relacionadas à utilização destas tecnologias, são de suma importância. As pesquisas trazem ao produtor dados que o ajudam a minimizar problemas, e trazem soluções importantes para um melhor aproveitamento de seu tempo e recursos, evitando assim o desperdício de energia de trabalho e recursos financeiros. O agronegócio no Brasil trouxe desenvolvimento técnico ao setor agrícola nas últimas décadas, com ênfase na combinação de contribuições químicas, o Brasil tem boas perspectivas no agronegócio, que estas características fazem do empreendedorismo agrícola o motor da economia nacional (PÉRA; PAIVA, 2023).

No Brasil, a agricultura de precisão (AP) desempenha um papel importante neste cenário porque aborda a otimização de produção, processos e custos e ajuda o agronegócio a aumentar a produtividade, consumindo menos e evitando desperdícios (ARTIOLI; BELONI, 2016). Oliveira et al., 2020, afirmam que a agricultura de precisão (AP) tem levado a melhorias nos sistemas de produção na agricultura, otimizando recursos e mitigando impactos ambientais.

Segundo Péra e Paiva (2023), com tecnologia mais avançada, o agricultor consegue identificar, por exemplo, quais áreas estão com mais infestações, tornando o uso de produtos químicos mais eficazes. De acordo com Gasparetto et al.(2023), as áreas de agricultura onde as máquinas terrestres têm dificuldades em executar operações agrícolas, os VANTs (Veículo Aéreo Não Tripulado), apresentam vantagens significativas.

Schröder et al. (2023) ainda destaca que em lavouras conduzidas com estreito espaçamento entre linhas, as perdas de produtividade, causadas pelo trânsito dos pulverizadores, supera a cifra de cinco sacos por hectare. Pino (2019), enfatiza que os drones podem ser classificados por tipo de controle que eles usam e podem ser independentes (sem a necessidade de guiar um piloto humano).

O desenvolvimento de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) tornou-se uma importante ferramenta de AP e índices simples de vegetação como ferramenta de adaptação ao manejo visando aumentara produtividade e também reduzir os custos de produção (DE SOUZA et al., 2019). Artioli e Beloni (2016) acrescentam que estas aeronaves se tornaram aliados da AP no Brasil porque são precisos, permitem a detecção e monitoramento de grandes áreas em tempo real e em qualquer lugar.

O drone é uma tecnologia que vem cada vez mais sendo utilizada, e com toda certeza veio para ficar, pesquisas sobre a sua utilização farão toda a diferença, pois dará um norte aos

ISBN 978-65-990392-6-3

seus usuários, de como e em quais casos é o ideal para sua utilização. Nas literaturas encontramos poucas pesquisas relacionadas à aplicações de defensivos e de sólidos utilizando drones, mas isto não impede que a utilização de drones para estas atividades e sua utilização continue crescendo. Schröder et al. (2023) afirma que uma das vantagens do uso de drones agrícolas do ponto de vista econômico é o fato de não ocorrer o amassamento das culturas, diferente de aplicações com equipamentos terrestres, principalmente em culturas de grãos.

A aplicação de sólidos utilizando drone tem se tornado uma alternativa promissora para diversas áreas como agricultura, engenharia civil e monitoramento ambiental. Na agricultura podemos utilizar para a aplicação de fertilizantes, buscando uma cobertura mais uniforme e melhorando assim a absorção de nutrientes pelas plantas e no controle de pragas, fazendo a aplicação de defensivos de maneira mais precisa, diminuindo o desperdício e minimizando os impactos ambientais.

Como a aplicação de sólidos ainda é uma área com poucos dados de pesquisa obtidos, este trabalho vem contribuir trazendo dados importantes para facilitar o produtor agrícola e usuários de drones na sua utilização e na tomada de decisão. A hipótese que norteou este estudo foi que a altura e a velocidade de operação do drone têm impacto na uniformidade da distribuição de sólidos. A combinação perfeita entre esses fatores, tem impacto direto na uniformidade da distribuição dos grânulos, proporcionando a melhor dispersão dos sólidos, reduzindo as perdas e aumentando a eficiência da aplicação.

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo identificar qual a altura e a velocidade de voo que proporciona uma distribuição de ureia uniforme.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Um experimento foi realizado a campo na Estação Agronômica da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs), na Unidade em Cachoeira do Sul - RS, localizada no distrito de Três Vendas, interior do município, latitude 29°53’06,04” S, longitude 53°00’32,76” W e altitude média de 125 m. Foram realizados voos com um drone da marca XAG, modelo P100 (figura 1), com capacidade de 40 litros para líquidos e 50 Kg para sólidos, o qual foi utilizado em parceria com a empresa Agrodrones Cachoeira.

Figura 1 - Drone marca XAG modelo P100 utilizado no experimento.



Fonte: Autores (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

Os voos foram efetuados em três diferentes alturas em relação ao solo, sendo de 6 ,0; 8,0 e 1 0 ,0 m e, em cada uma das alturas, foram realizados voos com três velocidades (4,0, 6,0 e 8,0 m s^{-1}). Estes parâmetros foram configurados no aplicativo XAG One, visando uma taxa alvo de aplicação equivalente a 50 kg de ureia por hectare..

Para a coleta da quantidade de sólidos aplicada pelo drone foram utilizadas bandejas coletoras de plástico nas dimensões (52 cm x 52 cm x 10,5 cm), baseadas na norma ISO 5690 (figura 2). O local utilizado possuia piso plano e de concreto, auxiliando no correto posicionamento das bandejas coletoras e evitando a contaminação das amostras com palha ou poeira, devido ao vento da passagem do drone, o que poderia afetar a coleta de dados e alterar os valores das pesagens.

Figura 2. Bandeja coletora padrão utilizada no experimento.



Fonte: Autores (2025).

As bandejas coletoras foram distribuídas em uma faixa de 10 m de largura, com distância de 1,25 m, totalizando 8 bandejas (figura 3), sendo que o drone sobrevoou a faixa de aplicação nas diferentes alturas e velocidades aplicando sólidos, com objetivo de aplicar 50 $Kg.ha^{-1}$ (regulagem do equipamento). O sólido utilizado foi ureia granulada, sendo que, após cada voo foi realizada a pesagem da quantidade de grânulos em cada bandeja coletora, sendo as amostras pesadas em balança de precisão.

Figura 3. Disposição das bandejas coletoras utilizadas no experimento.



Fonte: Autores (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

Ao analisar os dados, foi observado que as bandejas da extremidade da faixa tiveram nula ou muito pequena captação dos grânulos de ureia e estas amostras foram desconsideradas nas avaliações. Sendo assim, a faixa considerada útil foi de 7,5 m de largura, corroborando com a recomendação do fabricante do drone, cuja largura da faixa para aplicação de ureia recomendada é de 6 a 8 m.

Antes da realização das avaliações foi realizada a verificação das condições meteorológicas, utilizando-se um termohigroanemômetro digital (figura 4), onde foram avaliadas a temperatura do ar (T°), velocidade do vento (VV) e umidade relativa do ar (UR). As condições meteorológicas foram consideradas ideais para o voo, portano, foi dada sequência às avaliações. Segundo ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil , 2022), dias ensolarados e com vento calmo ou fraco oferecem menor risco à segurança das operações deste tipo de equipamento, resultando em maior uniformidade de aplicação.

Figura 4. Termo-higro-anemômetro utilizado para verificar as condições metereológicas no momento da realização do experimento.



Fonte: Autores (2025).

Os dados coletados foram tabulados e organizados em planilhas e, para cada voo realizado foi analisada a dosagem aplicada, o perfil de distribuição, a quantidade média aplicada, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

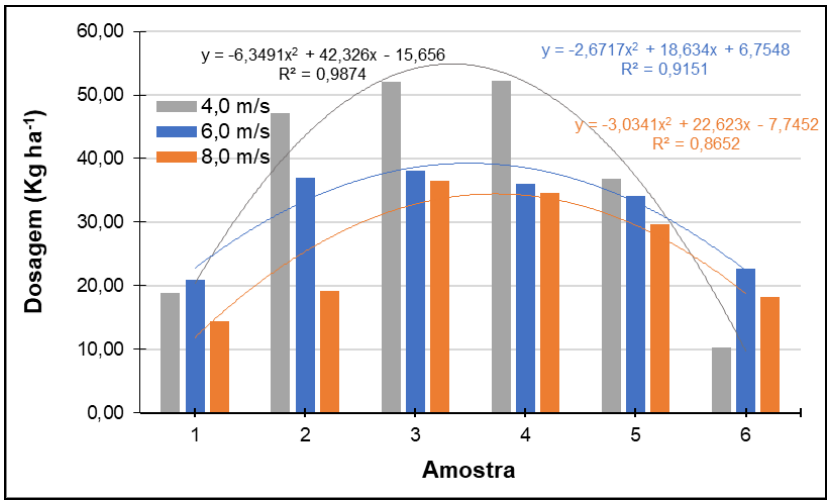
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao analisar os resultados das dosagens coletadas nas bandejas após o voo do drone a 6,0 m de altura nas diferentes velocidades analisadas (figura 5), foi observado que a maior quantidade de ureia foi depositada nos coletores localizados na região central da faixa de aplicação, o que coincide com o local sobrevoado, consequentemente, nos coletores mais periféricos, uma menor quantidade de ureia foi depositada, indicando a necessidade de realização de sobreposição para garantir uniformidade na distribuição ao longo da faixa de aplicação. Nesta altura de voo (6 m), observou-se a deposição de dosagens que atenderam a taxa alvo (50 kg ha^{-1}) apenas nos coletores centrais, quando o voo foi realizado na velocidade

ISBN 978-65-990392-6-3

de 4 m.s^{-1}. Para voos realizados nas velocidades de 6 e 8 m s^{-1}, o mesmo comportamento foi observado (maior deposição nos coletores centrais), porém, a taxa alvo não foi alcançada.

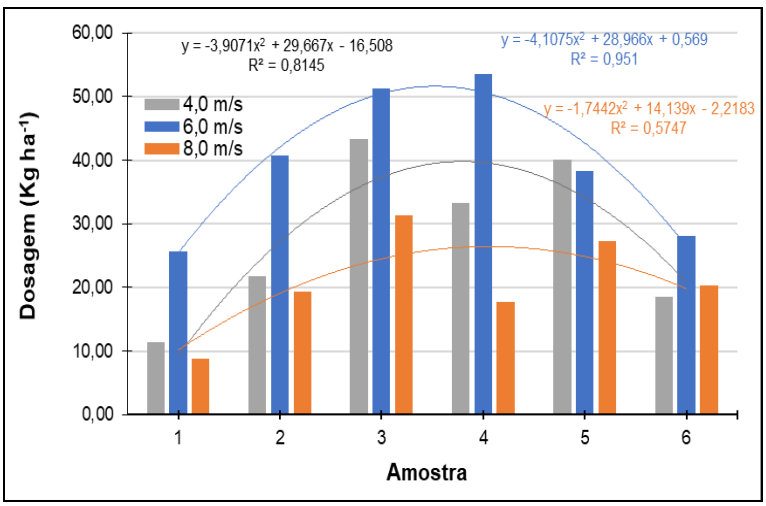
Figura 5. Dosagem coletada em cada amostra e perfil de distribuição no voo realizado a 6,0 m de altura.



Fonte: Autores (2025).

Na altura de voo de 8,0 m do drone (figura 6) podemos observar que na velocidade de voo de 6,0 m.s^{-1} as amostras apresentaram dosagens mais próximas ao pretendido (50 Kg.ha^{-1}), também com maiores valores coletados na região central das amostras (3 e 4), o que coincide com o local onde passou o drone, ficando evidente, que nas amostras das bordas (1 e 2 e, 5 e 6) há a necessidade de sobrepasse para que os valores coletados se aproximem dos 50 Kg.ha^{-1}.

Figura 6. Dosagem coletada em cada amostra e perfil de distribuição no voo realizado a 8,0 m de altura.



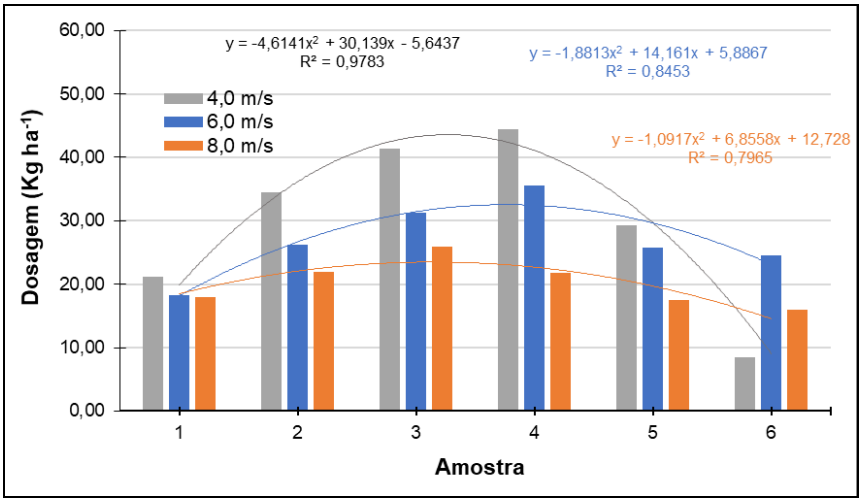
Fonte: Autores (2025).

Na altura de voo de 10,0 m do drone (figura 7) podemos observar que na velocidade de voo de 4,0 m.s^{-1} as amostras apresentaram dosagens mais próximas ao pretendido (50 Kg.ha^{-1}), mais abaixo dos 50 Kg ha^{-1} que era a dosagem pretendida. Assim como nas demais alturas de voo os maiores valores coletados foram na região central das amostras (3 e 4), o que

ISBN 978-65-990392-6-3

coincide com o local onde passou o drone, ficando evidente, que nas amostras das bordas (1 e 2 e, 5 e 6) há a necessidade de sobrepasse. Segundo Oliveira (2022), ao usarem diferentes alturas e velocidade de aplicação, ao passo que há um aumento na altura de aplicação ocorre a diminuição na faixa efetiva.

Figura 7. Dosagem coletada em cada amostra e perfil de distribuição no voo realizado a 10,0 m de altura.



Fonte: Autores (2025).

A tabela 1 apresenta as dosagens médias de sólidos para cada combinação de altura e velocidade de voo testada. Observa-se que nenhuma das combinações de altura e velocidade de voo atingiram a dosagem média desejada de 50 Kg.ha^{-1}, sendo a média mais alta registrada de 39,65 Kg.ha^{-1} na altura de 8,0 m e velocidade 6,0 m.s^{-1}, seguida por 36,19 Kg.ha^{-1} na altura de 6,0 m e velocidade 4,0 m.s^{-1}.

Tabela 1 -Dosagens médias de sólidos (Kg.ha^{-1}) para cada combinação de altura e velocidade de voo avaliada.

Altura de voo (m)	Velocidade de voo (m.s^{-1})	Dosagem média (Kg.ha^{-1})
6,0	4,0	36,19 a A*
6,0	6,0	31,45 ab AB
6,0	8,0	25,42 b A
8,0	4,0	28,07 b A
8,0	6,0	39,65 a A
8,0	8,0	20,82 b A
10,0	4,0	29,86 a A
10,0	6,0	26,92 ab B
10,0	8,0	20,17 b A

*Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p<0,05$), sendo que, as letras minúsculas comparam as diferentes velocidades de voo dentro de uma mesma altura de voo, enquanto, as letras maiúsculas comparam as alturas de voo dentro de uma mesma velocidade de voo. Fonte: Autores (2025).

Diante deste dados, e analisando o perfil da distribuição das dosagens das figuras 5 a 7, fica evidente a necessidade de sobrepasse nas aplicações, para que as amostras das bordas

ISBN 978-65-990392-6-3

da faixa de aplicação recebam complementação na próxima passada/faixa, de forma que a quantidade média das amostras fique próxima ao desejado, no caso, 50 Kg.ha^{-1}.

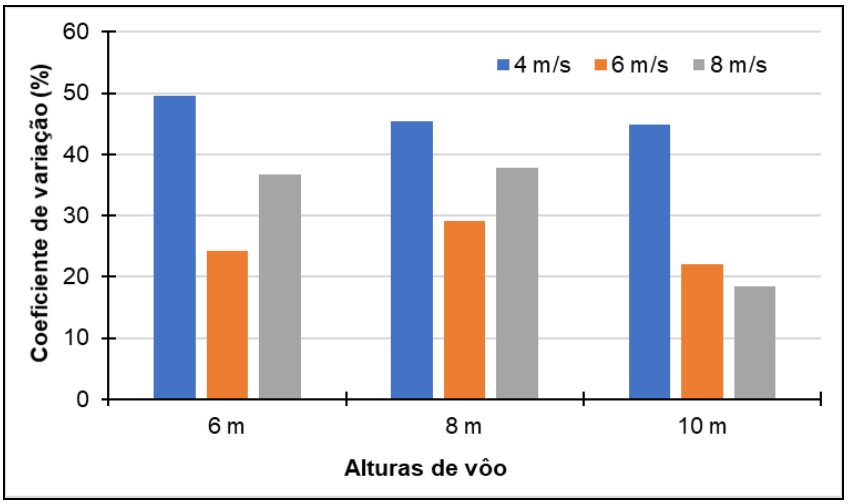
Ao analisar individualmente as alturas de voo, observa-se que a 6,0 m a velocidade de 4,0 m.s^{-1} resultou na maior dosagem (36,19 Kg.ha^{-1}). Na altura de 8,0 m foi a velocidade de 6,0 m.s^{-1} que resultou na maior dosagem (39,65 Kg.ha^{-1}), enquanto que, na altura de 10,0 m foi a velocidade de 4,0 m.s^{-1} que resultou na maior dosagem (29,86 Kg.ha^{-1}).

Ao analisarmos as velocidades de voo, observa-se que nas velocidades de 4,0 e 8,0 m.s^{-1} não houve diferença na dosagem entre as alturas avaliadas, enquanto que, na velocidade de 6,0 m.s^{-1} a maior dosagem (39,65 Kg.ha^{-1}) foi na altura de voo de 8,0 m.

A avaliação da uniformidade será complementada pela análise do perfil de distribuição dos grânulos nas 6 repetições de bandejas coletoras, representados por gráficos que demonstram a consistência da aplicação ao longo da faixa de 7,5 m através de coeficiente de variação (figuras 8 e 9).

Ao analisar o coeficiente de variação das diferentes alturas de voo (figura 8), observamos que nas alturas de 6,0 e 8,0 m de voo o menor coeficiente de variação foi observando na velocidade de 6,0 m.s^{-1}, enquanto que, na altura de 10,0 m de voo o menor coeficiente de variação foi observando na velocidade de 8,0 m.s^{-1}. Na altura de voo de 10 m observou-se os menores valores de coeficiente de variação, ou seja, as menores diferenças entre as amostras, porém, conforme pode ser observado na figura 7 e tabela 1, a dosagem aplicada ficou aquém da preconizada, indicando necessidade de ajuste na calibração do drone para essa altura de voo.

Figura 8. Coeficiente de variação na distribuição de sólido nas diferentes alturas em função da velocidade de voo do drone.

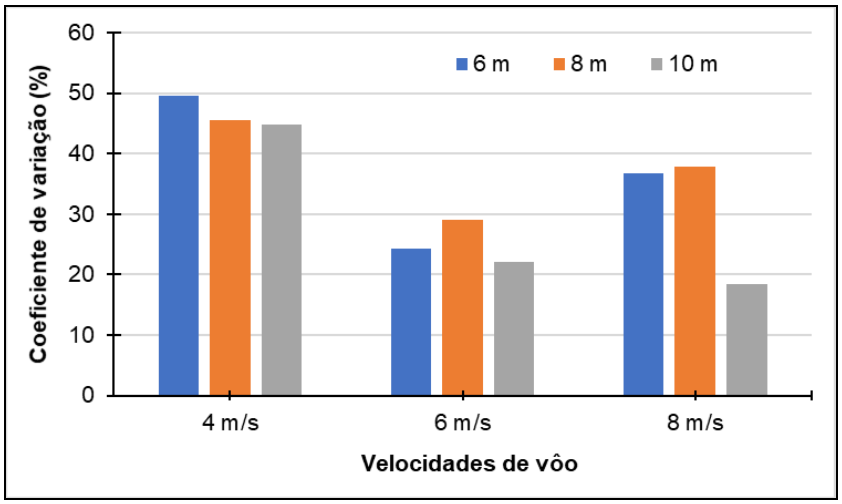


Fonte: Autores (2025).

O coeficiente de variação nas diferentes velocidades de voo em função das alturas (figura 9) foi, de maneira geral, maior na velocidade de 4,0 m.s^{-1} em todas as alturas de voo analisadas, enquanto que, nas velocidades de 6,0 e 8,0 m.s^{-1} a altura de 10,0 m apresentou menor coeficiente de variação entre as amostras.

ISBN 978-65-990392-6-3

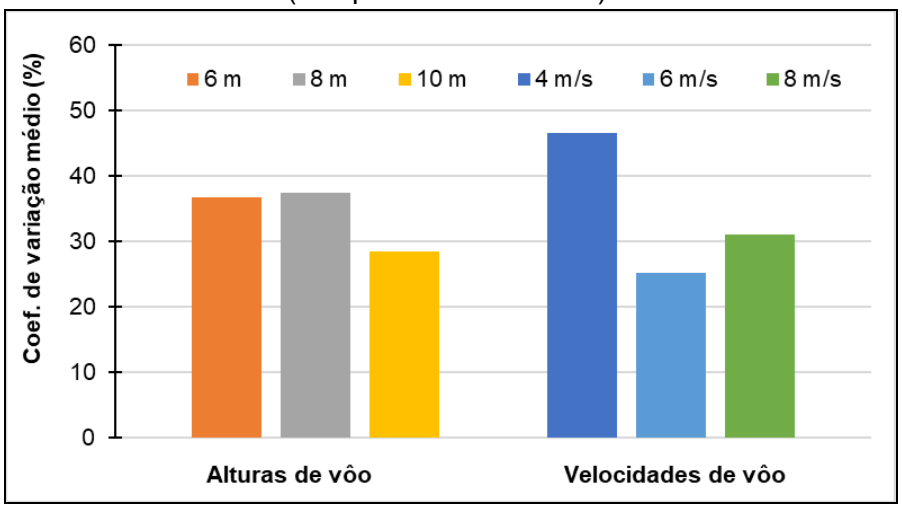
Figura 9. Coeficiente de variação na distribuição de sólido nas diferentes alturas em função da velocidade de voo do drone.



Fonte: Autores (2025).

Na Figura 10 é apresentado o coeficiente de variação médio (CVm, %) para a distribuição de sólidos considerando as diferentes alturas (independete da velocidade) e as diferentes velocidades (independente da altura). Foi observado que o menor valor ficou na altura de voo de 10 m e na velocidade de voo de 6,0 m.s^{-1}.

Figura 10 - Coeficiente de variação médio (CVm, %) para a distribuição de sólidos considerando as diferentes alturas (independete da velocidade) e as diferentes velocidades (independente da altura).



Fonte: Autores (2025).

A aplicação de fertilizantes realizada por distribuidores a lanço, sejam eles tratorizados ou mesmo autopropelidos, já é consolidada, porém, a utilização de drones ainda carece de estudos técnicos. Manter a uniformidade de distribuição de fertilizante na faixa de deposição é primordial para o sucesso desta modalidade de aplicação. Machado et al. (2023) enfatizam que o aumento da produtividade dependede uma adubação uniforme, fator esse, responsável por impulsionar a aplicação a lanço na agricultura, haja visto, ainda, a possibilidade de realizar tal operação antes ou mesmo após a implantação da cultura à campo.

As informações geradas são de grande importância para orientar produtores agrícolas e usuários de drones nas suas tomadas de decisões futuras, proporcionando maior

ISBN 978-65-990392-6-3

aproveitamento de tempo e recursos e auxiliando na redução de perdas. A pesquisa reforça o potencial dos drones como uma ferramenta essencial para a Agricultura de Precisão, promovendo a otimização de recursos e mitigação de impactos ambientais.

4 CONCLUSÃO

Foi verificada grande variação nas dosagens de aplicação conforme a altura e velocidade de voo do drone, destacando a importância da calibração minuciosa prévia do equipamento para que a quantidade previamente determinada seja realmente aplicada a campo.

Para o modelo de drone avaliado (XAG P100) na aplicação de ureia granulada a dosagem de aplicação média mais próxima da preconizada foi na altura de voo de 8,0 m e velocidade de 6,0 $m.s^{-1}$, seguida por, 6,0 m de altura e 4,0 $m.s^{-1}$.

Estes resultados demonstram a importância deste trabalho para a agricultura de precisão, pois a uniformidade na aplicação é de crucial para otimizar o uso de insumos, e assim garantir que as culturas recebam a quantidade adequada de nutrientes e, consequentemente, minimizar o desperdício de recursos e impactos ambientais.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento à empresa Agrodrones Cachoeira pela parceira na realização deste trabalho e a Universidade Estadual do Rio Grande do Sul pela disponibilização da Estação Agronômica para realização do experimento.

REFERÊNCIAS

ANAC. **Drones e a Meteorologia.** Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/meteorologia-aeronautica/assuntos- relacionados/drones-e-a-meteorologia Acesso em: 09 de outubro de 2023.

ARTIOLI, F.; BELONI, T. Diagnóstico do perfil do usuário de drones no agronegócio brasileiro. **Revista iPecege**, v. 2, n.3, p. 40-56, 2016.

CONFORTO, E. C.; AMARAL. D.C.; SILVA, S.L. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS, 8, 2011. **Anais...** Porto Alegre, 2011. p. 1-12.

DE SOUZA, D.C. et al. Auxílio de tomada de decisão no manejo e planejamento do plantio de soja com o processo de segmentação de imagens. **ReABTIC**, v. 1, n. 11, p. 11-23, 2019.

GASPARETTO, T. et al., **Implementação de aeronaves remotamente pilotadas na agricultura: Uma revisão bibliográfica.** Disponível em: file:///C:/Users/Jorge%20Silva/Downloads/jairo,+IMPLEMENTA%C3%87%C3%83O+DE+AERONAVES+REMOTAMENTE+PILOTADAS+NA+AGRICULTURA.pdf Acesso em: 03 de setembro de 2025. n. 11, p. 11-23, 2019.

MACHADO, T.M.; BURRATO, W.; MATOS, F.B.; CHAPLA, M.V.; SILVA, J.N.; VALE, W.G. Efeito de diferentes metodologias de coleta de dados em distribuidores de fertilizantes com

ISBN 978-65-990392-6-3

mecanismos de distribuição distintos. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.9, n.6, p.19032-19041, jun., 2023. DOI: 10.34117/bjdv9n6-022

OLIVEIRA, A. J. et al. Potencialidades Da Utilização De Drones Na Agricultura De Precisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 64140–64149, 2020.

OLIVEIRA, L. **Controle do míldio em videira 'brs magna' com o uso de aeronave remotamente pilotada.** Disponível em : https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/28122/1/arppulverizacaovideira.pdf Acesso em 03 de setembro de 2025.

PÉRA E PAIVA, 2023. A Utilização De Drones Na Agricultura: Uma Revisão Bibliográfica Entre 2012 E 2022 The Use Of Drones. In **Agriculture**: A Literature Review Between 2012 And 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Thiago-Pera/publication/373544690_A_UTILIZACAO_DE_DRONES_NA_AGRICULTURA_UMA_REVISAO_BIBLIOGRAFICA_ENTRE_2012_E_2022/links/64f7808782a02f6eb 33ae569/A-UTILIZACAO-DE-DRONES-NA-AGRICULTURA-UMA-REVISAO-

PINO, E.V. Los drones uma herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología. **IDESIA** (Chile), v. 37, n. 1, p. 75-84, 2019.

PLÁSTICOS, IGP. **Bandeja de coleta baseada na norma ISSO 5690.** Disponível em: https://igpplasticos.com.br/ Acesso em: 28 de novembro de 2023.

SCHRÖDER, E. et al. **Relato sobre experiência de uso de drones agrícolas no Brasil.** Disponível em: https://downloads.editoracientifica.com.br/articles/230312454.pdf. Acesso em: 03 de setembro de 2025.

TAFERNABERRI, V.J. **Avaliação da pulverização com drone em diferentes alturas e velocidades de voo.** Trabalho de Conclusão do Curso de Agronomia da Uergs Unidade em Cachoeira do Sul, 2023.

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 80

INTEGRAÇÃO DE SENSORES EMBARCADOS, PLATAFORMAS DIGITAIS E CIÊNCIA DE DADOS NA ANÁLISE ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA

Integration of embedded sensors, digital platforms, and data science in the spatial analysis of crop yield

Igor Drescher[1]; Larissa Meira[1]; André Müllich[1]; Luiz Felipe Silveira Pavão[1]; Marcelo S. Farias[1]; Luciano Z. Pes [1]; Ivan C. Maldaner[1]; Luiz Patric Kayser[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria-RS, Brasil, drescher.igor08@gmail.com; larissa.b.meira@gmail.com, andre.mullich@hotmail.com, felipepavao14@gmail.com, ivan.maldaner@ufsm.br, marcelo.farias@ufsm.br, lucianopes@politecnico.ufsm.br, patric@politecnico.ufsm.br

RESUMO

A digitalização da agricultura tem impulsionado a integração de sensores embarcados, plataformas digitais e ciência de dados para aprimorar o monitoramento da colheita. Este estudo foi realizado em uma lavoura de soja em Santa Maria, RS, utilizando uma colhedora híbrida de grãos, da marca Massey Ferguson®, modelo MF 4690HD equipada com o sistema Yieldtrakk®. Os dados foram importados para uma plataforma digital, onde relatórios iniciais de rendimento foram gerados. Os arquivos brutos foram exportados e processados em *Python* (*Google Colab*) com bibliotecas específicas para manipulação, análise estatística e visualização. Registros iguais a zero e *outliers* foram removidos, obtendo-se um conjunto de dados aceitáveis. Esses valores foram interpolados por krigagem, resultando no mapa de produtividade classificado em três zonas de produtividade, por quartis. Os resultados evidenciaram a heterogeneidade produtiva do talhão e a importância do pré-processamento dos dados. Conclui-se que, a integração entre sensores, plataformas digitais e ciência de dados permite gerar mapas confiáveis de produtividade.

Palavras-chave: Agricultura Digital. Filtragem de dados. Mapas de produtividade.

ABSTRACT

The digitalization of agriculture has fostered the integration of embedded sensors, digital platforms, and data science to improve harvest monitoring. This study was conducted in a soybean field in Santa Maria-RS, using a Massey Ferguson MF 4690 hybrid combine harvester equipped with the Yieldtrakk® system. Data were imported into a digital platform, where initial yield reports were generated. The raw files were exported and processed in Python (Google Colab) with specific libraries for data handling, statistical analysis, and visualization. Records equal to zero and outliers were removed, resulting in an acceptable dataset. These values were interpolated by kriging, producing a yield map classified into three productivity zones by quartiles. The results highlighted the heterogeneity of field productivity and the importance of data preprocessing. It is concluded that the integration of sensors, digital platforms, and data science enables the generation of reliable yield maps.

Keywords: Digital Agriculture. Data filtering. Yield maps.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

A agricultura contemporânea encontra-se em constante transformação, impulsionada pelo avanço das tecnologias digitais e pela crescente necessidade de sistemas produtivos mais eficientes e sustentáveis. Nesse cenário, a Agricultura de Precisão (AP) emergiu como uma estratégia fundamental para otimizar o uso de insumos, reduzir impactos ambientais e aumentar a rentabilidade das lavouras, por meio do monitoramento espacial e temporal das variáveis de produção (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

Mais recentemente, esse conceito evoluiu para a Agricultura Digital, caracterizada pela integração de sensores, *softwares* e plataformas em nuvem, capazes de ampliar a coleta, o processamento e a análise de grandes volumes de dados agrícolas (WALTER et al., 2017). Essa evolução não apenas modificou a forma como as propriedades rurais são gerenciadas, mas também estabeleceu as bases para a agricultura baseada em dados, ou *data-driven agriculture*.

As máquinas agrícolas, em especial as colhedoras, desempenham papel central nesse processo de transformação tecnológica. O desenvolvimento de colhedoras modernas, dotadas de sistemas eletrônicos e sensores embarcados, possibilitou a mensuração de variáveis críticas durante a operação de colheita, como produtividade de massa seca, velocidade de trabalho, teor de umidade dos grãos e posição geográfica (GRISSO; JASA; SCHROEDER, 2014). Essas informações, coletadas em tempo real, constituem a base para a elaboração de mapas de produtividade e análises operacionais, permitindo ao produtor compreender, com maior precisão, o desempenho de cada área da lavoura.

O uso de sensores em colhedoras não se limita apenas à geração de dados, mas envolve também a necessidade de armazenamento, processamento e interpretação dessas informações. Neste contexto, o avanço das plataformas digitais tem se mostrado essencial para transformar dados brutos em relatórios claros e acionáveis. De acordo com Fulton et al. (2017), a correta gestão e análise desses dados representam um dos principais desafios e, ao mesmo tempo, uma das maiores oportunidades da AP visto que, a qualidade da interpretação influencia diretamente a eficácia das decisões de manejo.

A Topcon Agriculture, por meio da plataforma TAP (*Topcon Agriculture Platform*), insere-se nesse movimento de digitalização ao disponibilizar uma solução integrada para processamento e análise de dados de colheita. Após a importação dos dados brutos coletados pela colhedora, a plataforma gera relatórios automatizados que permitem ao produtor avaliar a performance da operação, identificar variações de rendimento e planejar estratégias futuras com maior embasamento técnico (ZHANG, 2015). Assim, cria-se um ambiente em que tecnologia, dados e inteligência se combinam para dar suporte a um processo de gestão agrícola cada vez mais eficiente.

No entanto, para além do uso direto da plataforma TAP, é possível avançar na interpretação dos dados com ferramentas de ciência de dados, explorando abordagens mais flexíveis e aprofundadas. Neste sentido, a utilização do *Google Colab* como ambiente de programação, aliado à linguagem *Python*, permite executar rotinas de limpeza, tratamento, análise exploratória e processamento espacial sobre variáveis de colheita, como produtividade de massa seca, teor de umidade, velocidade da operação e coordenadas GNSS. Essa etapa de pós-processamento viabiliza não apenas a geração de mapas e relatórios customizados, mas também a extração de indicadores operacionais e a construção de modelos de suporte à decisão baseados em técnicas estatísticas.

Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo descrever os sensores instalados em uma colhedora híbrida de grãos, caracterizar os principais tipos de dados obtidos durante a operação de colheita e demonstrar um fluxo de análise de dados em *Python*, a partir

ISBN 978-65-990392-6-3

da extração dos dados do Topcon TAP, para interpretação, visualização espacial e apoio à tomada de decisão do produtor.

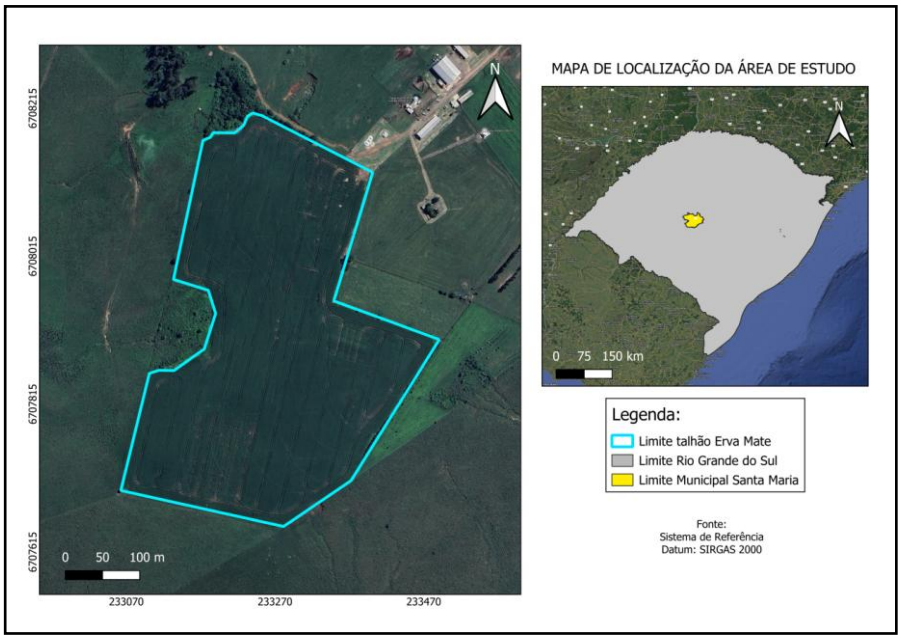
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido na área experimental do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), localizada no município de Santa Maria, RS. O experimento foi realizado no talhão denominado “Erva Mate”, com área de 13,55 hectares, situado numa altitude média de 95 metros. As coordenadas geográficas centrais do talhão são 29°43’49.75” S e 53°45’28.05” O.

De acordo com a classificação climática de Köppen, a região enquadra-se no tipo Cfa, clima subtropical úmido, com verões quentes e chuvas bem distribuídas ao longo do ano (ALVARES et al., 2013). Do ponto de vista fisiográfico, a área está localizada em uma zona de transição entre o Planalto Meridional Brasileiro e a Depressão Central do Rio Grande do Sul (Pereira, 2009). Na Figura 1 é apresentada a localização geográfica do talhão experimental, bem como o polígono limítrofe da área agrícola utilizada neste estudo.

Figura 1. Localização geografica e polígono limítrofe da área experimental "Erva Mate".
Fonte: Autores (2025).



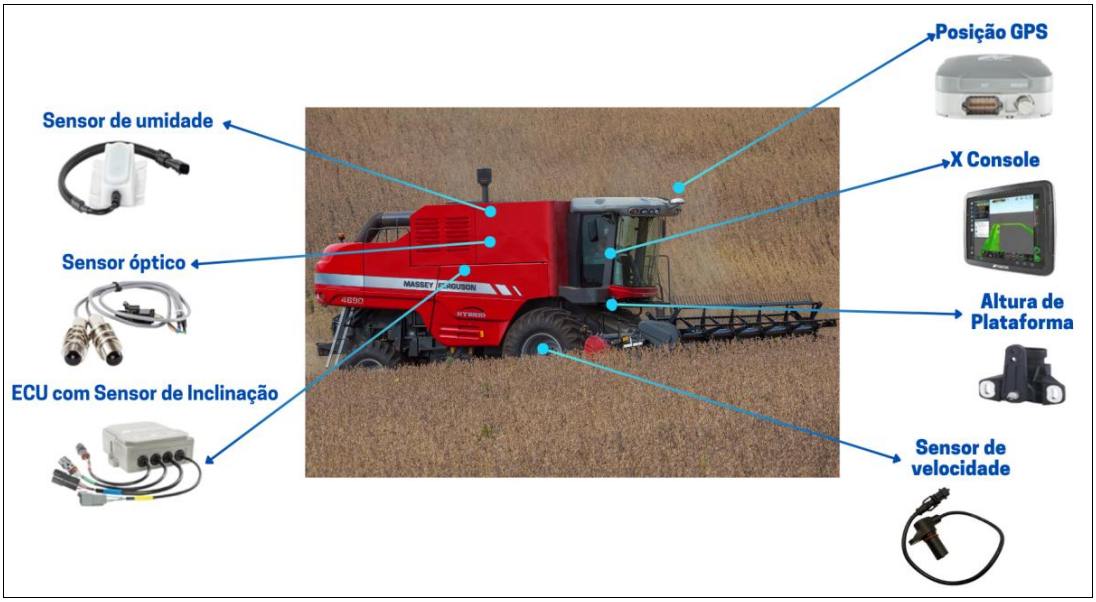
2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados

Os dados de produtividade foram coletados na safra 2024/2025 por meio de uma colhedora autopropelida de grãos marca Massey Ferguson®, modelo MF 4690HD equipada com o sistema Yieldtrakk®, responsável pelo monitoramento da produtividade em tempo real e georreferenciada por meio de sensores ópticos. Esses dados integram-se ao ecossistema digital Fuse®, por meio do módulo ProSense, que possibilita o gerenciamento e posterior utilização em plataformas de análise.

ISBN 978-65-990392-6-3

Para melhor compreensão do sistema de monitoramento de colheita utilizado, a Figura 2 apresenta a disposição dos principais sensores embarcados na colhedora MF 4690HD, bem como seus respectivos componentes eletrônicos associados. Esses sensores permitem a mensuração de variáveis críticas para a caracterização do rendimento da operação de colheita e o posterior processamento dos dados.

Figura 2. Sensores instalados na colhedora marca Massey Ferguson modelo MF 4690HD.



Fonte: Autores (2025).

A colhedora MF 4690HD estava equipada com diferentes sensores que, de forma integrada, permitem o monitoramento detalhado da operação de colheita. O sensor de umidade mede o teor de água nos grãos no momento da colheita, por meio do princípio da capacitância, informação essencial para avaliação do rendimento corrigido e para a logística de secagem e armazenamento. O sensor óptico de fluxo de massa registra, em tempo real, a quantidade de material colhido, constituindo a base para a determinação da produtividade georreferenciada. A ECU com sensor de inclinação corrige eventuais distorções, causadas pela declividade do terreno, assegurando maior precisão nos registros de produtividade.

O sensor de velocidade capta a velocidade de trabalho da máquina, variável diretamente relacionada à eficiência operacional e ao controle de perdas de colheita. Já o sensor de altura da plataforma informa a posição relativa da barra de corte em relação ao solo, possibilitando ajustes na operação e melhorando a qualidade da coleta dos dados. O receptor GNSS fornece as coordenadas geográficas de cada registro, permitindo a espacialização das informações e a geração de mapas temáticos. Por fim, o console X atua como interface central de integração, processando e exibindo em tempo real os dados provenientes dos diferentes sensores, além de armazená-los para posterior exportação e análise.

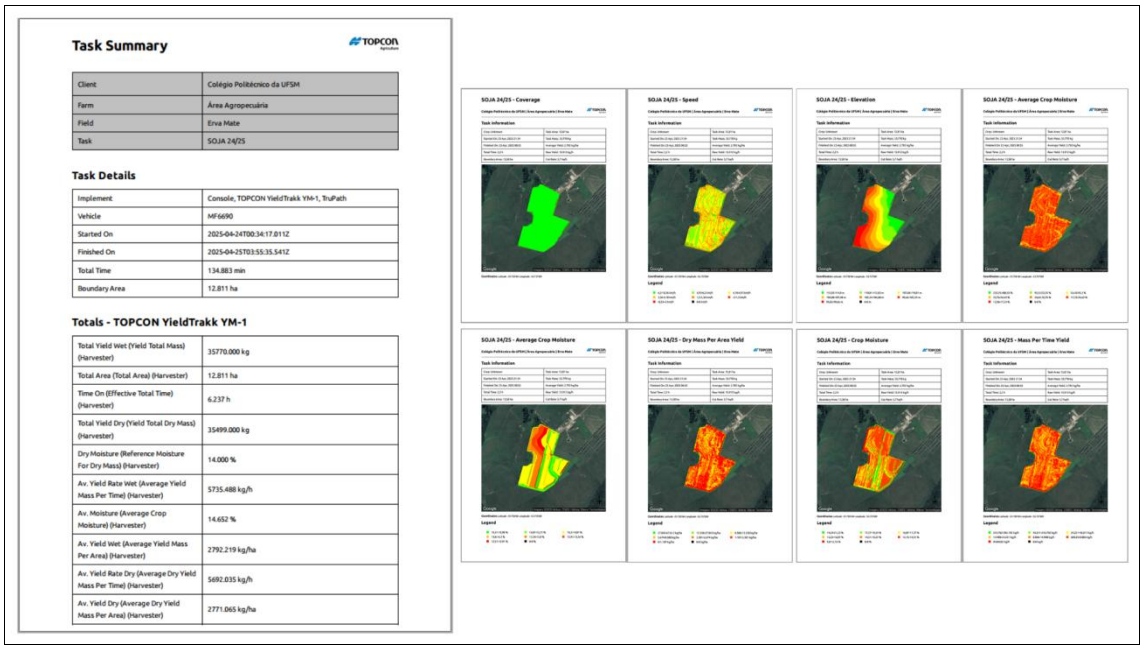
A plataforma de corte da colhedora determinou a largura da faixa amostrada, 20 pés ou aproximadamente 6 metros de largura de corte, enquanto o avanço registrou pontos em frequência aproximada de 1 Hz (um ponto por segundo). Considerando a velocidade média de operação (~5 km h^{-1}), isso correspondeu a um espaçamento de ~1,4 m entre registros na direção do deslocamento, resultando em uma malha densa de pontos para caracterização espacial da produtividade.

Em seguida, os dados brutos foram importados para a plataforma digital Topcon TAP, onde foram organizados e convertidos em relatórios iniciais de rendimento. Na Figura 3 são

ISBN 978-65-990392-6-3

apresentados os relatórios gerados pela plataforma digital, contendo o resumo da operação de colheita e os mapas temáticos derivados dos dados de sensores embarcados. Esses relatórios incluem informações detalhadas sobre a cobertura da área, velocidade, altitude, umidade média, produtividade em massa seca por área, além de indicadores de rendimento em diferentes escalas. Tais representações permitem uma primeira interpretação do desempenho da colheita, fornecendo subsídios iniciais para a análise espacial dos resultados.

Figura 3. Relatórios gerados pela plataforma digital Topcon TAP a partir dos dados coletados pela colhedora marca Massey Ferguson modelo MF 4690HD.



Task Summary

Client	Colégio Politécnico da UFSM
Farm	Área Agropecuária
Field	Erva Mate
Task	SOJA 24/25

Task Details

Implement	Console, TOPCON YieldTrakk YM-1, TruPath
Vehicle	MF6690
Started On	2025-04-24T00:34:17.011Z
Finished On	2025-04-25T03:55:35.541Z
Total Time	134.883 min
Boundary Area	12.811 ha

Totals - TOPCON YieldTrakk YM-1

Total Yield Wet (Yield Total Mass) (Harvester)	35770.000 kg
Total Area (Total Area) (Harvester)	12.811 ha
Time On (Effective Total Time) (Harvester)	6.237 h
Total Yield Dry (Yield Total Dry Mass) (Harvester)	35499.000 kg
Dry Moisture (Reference Moisture For Dry Mass) (Harvester)	14.000 %
Av. Yield Rate Wet (Average Yield Mass Per Time) (Harvester)	5735.488 kg/h
Av. Moisture (Average Crop Moisture) (Harvester)	14.652 %
Av. Yield Wet (Average Yield Mass Per Area) (Harvester)	2792.219 kg/ha
Av. Yield Rate Dry (Average Dry Yield Mass Per Time) (Harvester)	5692.035 kg/h
Av. Yield Dry (Average Dry Yield Mass Per Area) (Harvester)	2771.065 kg/ha

Fonte: Autores (2025).

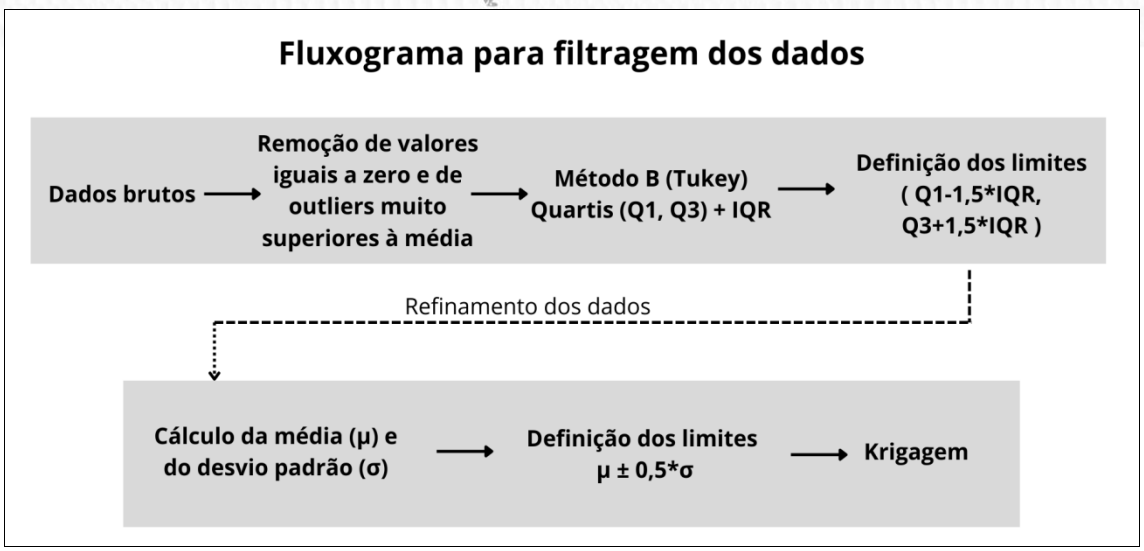
Para análises avançadas, os arquivos exportados do TAP foram processados em ambiente de ciência de dados no *Google Colab*, utilizando a linguagem *Python*. Nessa etapa, foram realizadas rotinas de limpeza, tratamento de inconsistências, análise exploratória, processamento espacial e geração de mapas temáticos, visando aprofundar a interpretação dos resultados e subsidiar a tomada de decisão.

A análise iniciou-se a partir dos dados brutos de produtividade de soja em massa seca (kg ha^{-1}), exportados da plataforma digital Topcon TAP. Inicialmente, os arquivos foram importados para o ambiente *Google Colab*, sendo manipulados por meio da linguagem *Python* com auxílio da biblioteca pandas, utilizada para leitura dos arquivos CSV, organização tabular e inspeção preliminar das variáveis registradas.

O processamento dos dados foi realizado em ambiente Python no Google Colab, utilizando as bibliotecas pandas (leitura e organização tabular dos dados), numpy (operações matemáticas), matplotlib e seaborn (visualização exploratória), geopandas e shapely (manipulação espacial e integração com SIG). As etapas de limpeza incluíram a remoção de valores nulos, registros iguais a zero e outliers extremos. Posteriormente, aplicou-se o método de Tukey (baseado em quartis e intervalo interquartílico) e, em seguida, o refinamento por limites estatísticos em função da média e desvio-padrão (μ ± 0,5σ). O fluxograma da Figura 4 resume o processo adotado para filtragem e interpolação dos dados.”

Figura 4. Fluxograma representando as etapas de pré-processamento, filtragem e interpolação dos dados de produtividade de soja.

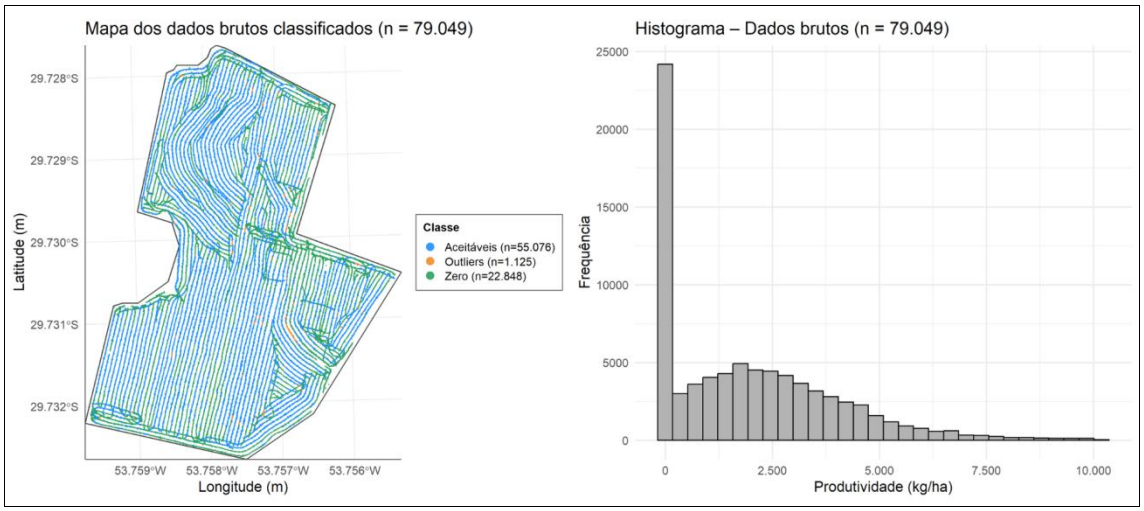
ISBN 978-65-990392-6-3



Fonte: Autores (2025).

Na etapa seguinte, buscou-se identificar e remover valores caracterizados como ruídos do processo de coleta associados ao funcionamento da colhedora. Inicialmente, foram analisados os dados brutos de produtividade (Figura 5), nos quais se observou a presença de registros inconsistentes. Dentre eles, destacam-se os valores iguais a zero, obtidos durante o deslocamento da máquina com a plataforma abaixada e sem fluxo de grãos, situação que gera pontos artificiais de produtividade nula.

Figura 5. Dados brutos de colheita classificados e histograma.



Fonte: Autores (2025).

Além disso, valores anormalmente elevados foram classificados como *outliers*, geralmente ocasionados pelo acúmulo momentâneo de soja na plataforma, resultando em leituras abruptas e irreais pelo sensor óptico de fluxo de massa. A identificação desses *outliers* foi realizada por meio de métodos estatísticos implementados em *numpy* e pandas, aplicando-se o critério interquartílico (IQR), no qual são considerados discrepantes os pontos inferiores a Q1 – 1,5·IQR ou superiores a Q3 + 1,5·IQR (Figura 6).

Além das etapas de filtragem, procedeu-se à decimação do dataset, de modo a reduzir a densidade de pontos redundantes coletados pelo monitor de colheita. Essa etapa consistiu em eliminar registros muito próximos espacialmente, mantendo apenas aqueles necessários

ISBN 978-65-990392-6-3

para representar a variabilidade do talhão, o que resultou em menor peso computacional e maior eficiência no processamento sem comprometer a qualidade da informação.

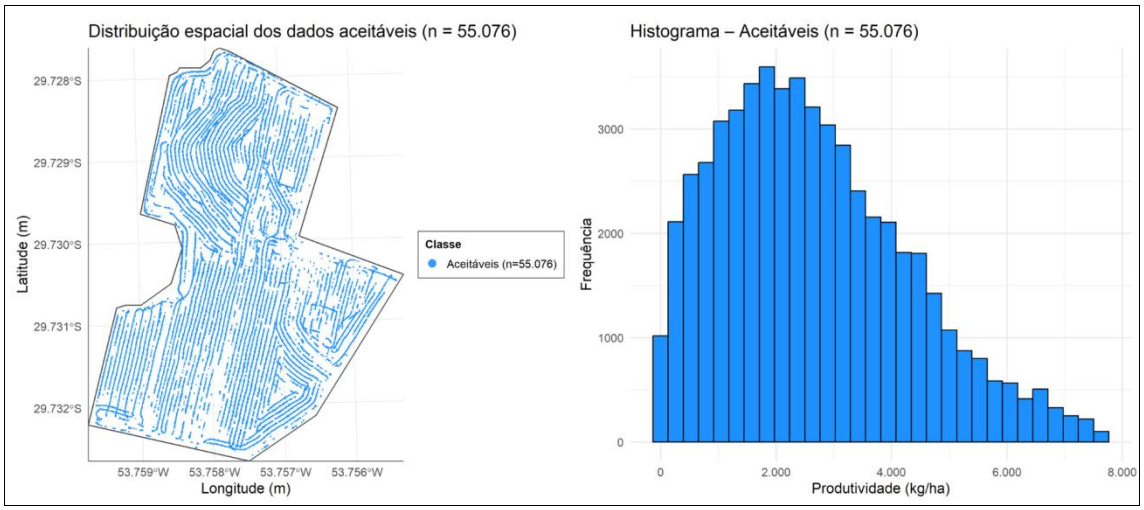
Figura 6. Identificação dos valores nulos, *outliers* e histograma.



Fonte: Autores (2025).

Após a filtragem, obteve-se o conjunto de dados aceitáveis (Figura 7), que representam de forma fidedigna a produtividade espacial da área em estudo. Para a análise espacial, as coordenadas geográficas (latitude e longitude) registradas durante a colheita foram transformadas em geometrias no formato de pontos, com auxílio da biblioteca geopandas e do módulo *shapely*, possibilitando a projeção dos dados em sistemas de referência adequados (SIRGAS 2000 / UTM 22S). Essa etapa permitiu a elaboração de representações espaciais das três classes de pontos (zeros, *outliers* e aceitáveis), fundamentais para o refinamento dos dados e para a interpretação subsequente.

Figura 7. Identificação e histograma dos valores aceitáveis.



Fonte: Autores (2025).

As visualizações foram produzidas com a biblioteca *matplotlib*, permitindo a construção de gráficos e mapas de distribuição espacial em diferentes escalas, enquanto os histogramas de frequência dos três conjuntos de dados (brutos, *outliers* e aceitáveis) foram elaborados com

ISBN 978-65-990392-6-3

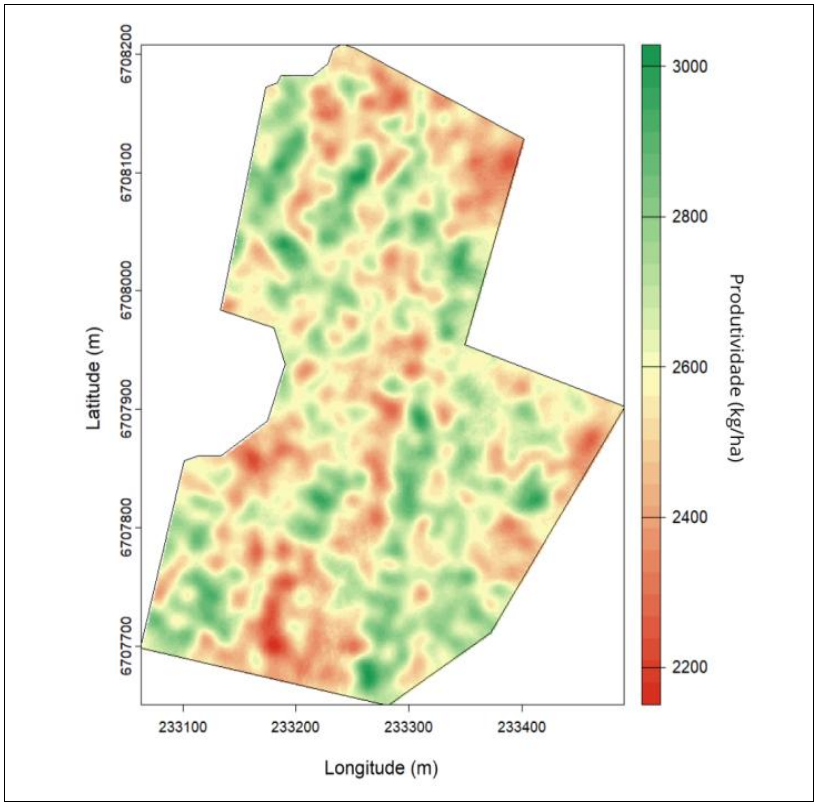
matplotlib e *seaborn*, fornecendo suporte à análise exploratória. Assim, os resultados gráficos possibilitaram compreender a evolução do processo de filtragem e a representatividade de cada classe de pontos.

Por fim, o conjunto de dados classificados como aceitáveis serviu de base para a interpolação por krigagem, com o objetivo de gerar o mapa de produtividade real do talhão “Erva Mate”. Esse procedimento foi conduzido com bibliotecas específicas de geoestatística, como *PyKrige* e *GSTools*, que permitem a modelagem de semivariogramas e a execução da interpolação espacial com base em princípios estatísticos robustos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 8 apresenta o mapa de produtividade da soja obtido após a etapa de filtragem dos dados e interpolação por krigagem, representando a variabilidade espacial da produção no talhão “Erva Mate”. Para a elaboração do mapa, os valores interpolados foram classificados em três zonas de produtividade com base em quartis: os 25% menores valores foram atribuídos à zona de baixa produtividade (representada em vermelho), os 50% intermediários à zona de produtividade média (em amarelo) e os 25% maiores valores à zona de alta produtividade (em verde). Essa abordagem possibilitou uma interpretação mais clara da heterogeneidade do talhão, segmentando-o em áreas com diferentes potenciais de rendimento.

Figura 8. Mapa de produtividade da soja no talhão Erva Mate, na safra 2024/2025.



Fonte: Autores (2025).

Observa-se a amplitude de produtividade variando aproximadamente entre 2.200 e 3.000 kg ha^{-1}, com predominância de áreas intermediárias (≈ 2.600 kg ha^{-1}) e ocorrência de zonas de maior e menor rendimento distribuídas de forma heterogênea ao longo do talhão. Esse padrão espacial evidencia a importância do tratamento prévio dos dados, uma vez que a

ISBN 978-65-990392-6-3

exclusão de zeros e *outliers* contribuiu para reduzir distorções e permitir a representação fidedigna da realidade produtiva.

A interpolação por krigagem mostrou-se adequada para o contexto do estudo, pois considera a dependência espacial entre os pontos de amostragem, resultando na superfície contínua que reflete de forma consistente as variações locais de produtividade. Esse tipo de abordagem já é consolidado em análises geoestatísticas aplicadas à Agricultura de Precisão, permitindo identificar Zonas de Manejo específicas e orientar estratégias de tomada de decisão em campo (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015; FULTON et al., 2017).

4 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou o potencial do uso de sensores embarcados em colhedoras de grãos aliados às plataformas digitais e técnicas de ciência de dados para a análise da produtividade agrícola. A colheita realizada no talhão “Erva Mate” evidenciou a importância da etapa de filtragem de dados, com a identificação e exclusão de valores nulos e *outliers*, dando confiabilidade às análises subsequentes.

A integração dos dados com a plataforma Topcon TAP permitiu a organização inicial das informações de campo, enquanto o processamento em *Python* possibilitou análises avançadas e a interpolação por krigagem e classificação em zonas de produtividade, resultando no mapa detalhado da variabilidade espacial da lavoura.

Conclui-se que, a combinação entre sensores, plataformas digitais e ciência de dados constitui no caminho promissor para o aprimoramento do monitoramento agrícola, permitindo ao produtor compreender de forma aprofundada o desempenho da lavoura e planejar intervenções mais assertivas.

REFERÊNCIAS

ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar; DE MORAES GONÇALVES, José Leonardo; SPAROVEK, Gerd. Mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507.

FULTON, John P.; PORT, Kevin M.; DARR, Matthew J.; SHEARER, Scott A. Data management considerations for precision agriculture. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 72, n. 2, p. 5A–8A, 2017. DOI: https://doi.org/10.2489/jswc.72.2.5A.

GRISSO, Robert; JASA, Phil; SCHROEDER, John. **Yield monitor accuracy**. Virginia Cooperative Extension, 2014. Disponível em: https://www.pubs.ext.vt.edu/442/442-504/442-504.html. Acesso em: 9 set. 2025.

MOLIN, José Paulo; AMARAL, Leonardo R.; COLAÇO, André F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

WALTER, Achim; FINGER, Robert; HUBER, Robert; BUCHMANN, Nina. Opinion: Smart farming is key to developing sustainable agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)**, v. 114, n. 24, p. 6148-6150, 2017. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1707462114.

ISBN 978-65-990392-6-3

ZHANG, Qin. **Precision agriculture technology for crop farming**. Boca Raton: CRC Press, 2015. DOI: https://doi.org/10.1201/b18219.



CAPÍTULO 81

ISBN 978-65-990392-6-3

DESEMPENHO DE SEMEADORA-ADUBADORA DE PRECISÃO VARIANDO A DENSIDADE DE SEMENTES

Performance of a precision seeder-fertilizer at different seeding rates

Luiz Felipe Silveira Pavão[1]; André Müllich[1]; Andrei Pezzini Holdefer[1]; Marcos Paulo Pereira Ribeiro[1]; Marcelo Silveira de Farias[1]; Ivan Carlos Maldaner[1]; Luciano Zucuni Pes[1]; Jaqueline Sgarbossa[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria - RS, Brasil, felipepavao14@gmail.com, andre.mullich@hotmail.com, andrei.holdefer@hotmail.com, marcosribeiroagro1@gmail.com, marcelo.farias@ufsm.br, ivan.maldaner@ufsm.br, lucianopes@politecnico.ufsm.br, sgarbossa.jaqueline@ufsm.br

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de uma semeadora-adubadora de precisão utilizando diferentes densidades de sementes na cultura da soja. Foram avaliadas as variáveis-resposta: densidade real de sementes, população final de plantas, distribuição longitudinal de sementes, distribuição longitudinal de plantas finais, coeficiente de variação dos espaçamentos entre sementes e coeficiente de variação dos espaçamentos entre plantas finais. O experimento foi conduzido no município de Santa Maria, RS, no delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em quatro densidades de semeadura: 230.000; 280.000; 330.000; e 380.000 sementes por hectare. A densidade real de sementes superou a prescrita nas duas menores taxas de semeadura utilizadas e ficou abaixo nas duas maiores taxas. A população final de plantas foi inferior à densidade prescrita. O aumento da densidade de semeadura reduziu os espaçamentos aceitáveis e aumentou os espaçamentos duplos entre sementes e plantas finais.

Palavras-chave: *Glycine max* L. Taxa variada de sementes. Agricultura de Precisão.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the performance of a precision planter-fertilizer using different seed densities in soybean cultivation. The response variables evaluated were: actual seed density, final plant population, longitudinal distribution of seeds, longitudinal distribution of final plants, coefficient of variation of seed spacing, and coefficient of variation of final plant spacing. The experiment was conducted in Santa Maria, RS, under a randomized block design, with four replications. Treatments consisted of four seeding densities: 230,000; 280,000; 330,000; and 380,000 seeds per hectare. The actual seed density exceeded the prescribed rate at the two lowest seeding densities and fell below it at the two highest densities. The final plant population was lower than the prescribed density. Increasing seeding density reduced acceptable spacings and increased double spacings between both seeds and final plants.

Keywords: *Glycine max* L. Variable seeding rate. Precision Agriculture.

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) é uma das principais oleaginosas cultivadas no mundo, com ampla utilização na alimentação humana e animal. O Brasil destaca-se como o maior produtor mundial da oleaginosa, com produção de 171,47 milhões de toneladas e área cultivada de 47,35 milhões de hectares, obtendo produtividade média de 3.621 kg ha^{-1} na safra 2024/2025 (CONAB, 2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

Tendo em vista o crescente aumento na demanda por alimentos ao nível mundial (ONU, 2019), é extremamente importante o emprego de estratégias que otimizem o uso dos recursos de produção no meio agrícola. Neste sentido, a agricultura contemporânea vem incorporando tecnologias que aumentam a precisão das operações em campo, desde a semeadura até a colheita, principalmente por meio do uso de eletrônica embarcada em máquinas e implementos agrícolas.

A taxa variada de sementes (TVS) está inserida como ferramenta da Agricultura de Precisão e Digital que busca otimizar taxa de sementes necessária para cada região dos talhões. O processo de otimização das quantidades de sementes utilizadas dentro da propriedade muitas vezes permite que o produtor rural economize no valor investido na compra das sementes e, ao mesmo tempo, garante maior uniformidade da produtividade do talhão (HAMMAN, 2021).

Na prática da TVS, a partir da definição da taxa média de sementes a ser utilizada, são gerados mapas de prescrição de sementes para diferentes regiões dos talhões agrícolas, de acordo com a definição de Zonas de Manejo, caracterizados por ambientes com diferentes potenciais de produção (PRUSINSKI et al., 2020). Com a definição de distintos ambientes dentro dos talhões, é comum para a cultura da soja o uso de taxas de sementes maiores para os ambientes de baixa produtividade e taxa de sementes menores para os ambientes de altas produtividades (ZHAO et al, 2023).

Estudos pioneiros sobre semeadura a taxa variada foram desenvolvidos por Corassa et al. (2018a) e Corassa et al. (2018b), com o intuito de analisarem diferentes densidades de semeadura de soja, cultivadas em ambientes de alta, média e baixa produção. Os autores observaram que, a taxa de semeadura, ou densidade de semeadura, pode ser reduzida em 18% nas Unidades Gestoras de alta produtividade, em comparação às de baixa produtividade. Além disso, verificaram que, taxas de semeadura acima de 330.000 sementes ha^{-1} apresentam reduzida possibilidade de aumentos em produtividade.

Independentemente da taxa de semeadura utilizada, segundo Maroni et al. (2005), para determinar a eficiência na qualidade de semeadura, deve-se avaliar, além da quantidade de plantas emergidas, a uniformidade de espaçamentos entre elas. A uniformidade de espaçamentos entre plantas na linha de semeadura é uma variável crucial para as plantas, pois reflete na eficiência de aproveitamento de recursos como água, luz e nutrientes (CALONEGO et al., 2011) e, consequentemente, pode influenciar na produtividade de grãos no momento da colheita.

De maneira geral, para a cultura da soja, existe a tendência de a presença de espaçamentos equidistantes entre sementes proporcionar aumento na produtividade de grãos (MASINO et al., 2018; VERSENDAAL et al., 2024; XU et al., 2021), tendo em vista que, neste caso, não ocorre competição intraespecífica entre plantas. Além disso, quando comparado o uso de diferentes taxas de semeadura, a importância de se ter o adequado espaçamento entre plantas na linha é maior com o uso de maiores densidades de sementes (MOURTZINIS et al., 2021), tendo em vista que com taxa de semeadura mais baixas, a cultura apresenta a capacidade de compensar a produtividade (COX et al, 2011).

A distribuição longitudinal inadequada pode resultar em falhas ou duplas de plantas, comprometendo o estande final e, potencialmente, a produtividade (SANGOI et al., 2020). Dessa forma, ainda que a definição de Zonas de Manejo seja uma estratégia relevante para mapear a variabilidade espacial, a eficácia da TVS também depende da capacidade da semeadora de manter a uniformidade no posicionamento das sementes ao longo da linha de cultivo, independentemente da densidade de semeadura utilizada. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de uma semeadora-adubadora de precisão utilizando diferentes densidades de sementes na cultura da soja.

ISBN 978-65-990392-6-3

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O experimento foi conduzido na Área Agropecuária do Colégio Politécnico, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), na cidade de Santa Maria, nas coordenadas geográficas Latitude 29º43'55" Sul e Longitude de 53º45'28" Oeste e altitude de, aproximadamente, 100 metros ao nível médio dos mares. O clima da região é o Cfa, subtropical úmido e com verões quentes, segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013). O talhão agrícola em que o experimento foi instalado é denominado "Erva-Mate", e possui solo classificado como Argissolo Bruno-Acinzentado (SANTOS et al., 2018).

A semeadura foi realizada no dia 05 de dezembro de 2024. Nesta data, o solo estava com consistência úmida, na condição friável. O experimento foi implantado no Sistema Plantio Direto, sobre palhada de trigo. Foi utilizado o delineamento em blocos ao acaso, com quatro tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos consistiram nas densidades de semeadura de 230.000; 280.000; 330.000 e 380.000 sementes por hectare. As parcelas experimentais possuíam 30 m de comprimento e 4,05 m de largura, totalizando área de 121,5 m^2.

A cultivar de soja utilizada no estudo foi a DM 66i68 RSF IPRO, com grupo de maturação 6.6 e caracterizada por possuir bom arranque inicial, alto potencial de ramificação e alta resistência ao acamamento, segundo informações da empresa detentora. As sementes utilizadas possuíam germinação mínima de 95%, e foram depositadas no solo em uma profundidade média de três centímetros. Foi misturado grafite na semente, em uma dose de, aproximadamente, 4 g kg^{-1}. A adubação de base consistiu na aplicação de 300 kg ha^{-1} da fórmula 02-23-23, respectivamente, NPK.

Foi utilizada uma semeadora-adubadora de precisão da marca Massey Ferguson®, modelo MF 509 H45, equipada com nove linhas de semeadura, espaçadas entre si em 0,45 m. A semeadora utilizada é equipada com o mecanismo dosador pneumático com acionamento tangencial do disco perfurado vertical, operado por motor elétrico, permitindo o monitoramento e a distribuição de sementes em taxa variável. As configurações de trabalho da semeadora são realizadas no monitor de sementes 20|20. Para a semeadura do experimento, foram utilizados discos verticais com 80 alvéolos de 4 mm, dispostos em duas fileiras concêntricas.

Para realizar a operação, a semeadora-adubadora foi tracionada por um trator agrícola da marca Massey Ferguson®, modelo MF 6714R (Figura 1A), com potência de 107 kW (145 cv), segundo informações do fabricante. O trator é equipado com piloto automático e sistema GNSS com correção RTK. A velocidade de trabalho utilizada durante a operação foi padronizada para 5,5 km h^{-1}.

Tendo em vista a necessidade de utilizar diferentes densidades de semeadura nas parcelas experimentais, foi elaborada uma prescrição de sementes utilizando a plataforma digital *Climate FieldView*, seguindo o croqui experimental. Nesta etapa, foram inseridas manualmente as densidades de semeadura para cada parcela experimental. O arquivo de prescrição de sementes foi importado no monitor 20|20 da semeadora.

Além disso, para garantir o correto posicionamento do conjunto mecanizado dentro da área experimental, foi elaborado um projeto de linhas de semeadura com o *software AgroCad*. O arquivo com o projeto de linhas de semeadura foi importado no monitor do trator. Desta forma, a implantação do experimento foi realizada buscando o uso da automação do conjunto mecanizado, por meio da prescrição de sementes e do projeto de linhas de semeadura trabalhando simultaneamente (Figura 1B).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 1 – Conjunto mecanizado utilizado para a implantação do experimento (A) e atuação simultânea da prescrição de sementes e do projeto de linhas de semeadura (B).



Fonte: Autores (2025)

Durante o ciclo, todos os manejos fitossanitários foram realizados de acordo com as recomendações técnicas para a cultura da soja (MARTIN et al., 2022). A safra 2024/25 foi marcada pela ocorrência do Fenômeno La Niña no Rio Grande do Sul. No local do experimento, o acumulado total de precipitação, da semeadura até a colheita, foi de 429,8 mm (INMET, 2025), com a presença de longos períodos sem chuvas. A soja demanda precipitação acumulada de 450-800 mm (EMBRAPA, 2013), ou seja, as condições meteorológicas observadas foram limitantes para o desenvolvimento da cultura, apesar da germinação ter sido uniforme.

2.2 COLETA, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Foram avaliadas as variáveis-resposta densidade real de sementes, população final de plantas, distribuição longitudinal de sementes, distribuição longitudinal de plantas finais, coeficiente de variação dos espaçamentos entre sementes e coeficiente de variação dos espaçamentos entre plantas finais.

A densidade real de sementes alcançada pela semeadora foi avaliada simultaneamente à qualidade da distribuição longitudinal de sementes, por meio da mensuração do comprimento linear necessário para atingir 256 espaçamentos, em cada parcela experimental. A população final de plantas foi avaliada simultaneamente à qualidade da distribuição longitudinal de plantas finais, por meio da contagem do número de plantas presentes em duas linhas de 4,5 m.

Para avaliar a qualidade da distribuição longitudinal de sementes, no dia 06 de dezembro de 2024 (um dia após a semeadura), foi realizada a mensuração da distância entre sementes em 256 espaçamentos por tratamento, com o auxílio de uma fita métrica. Para essa avaliação, foram escavadas pequenas covas ao longo das linhas de semeadura. A partir disso, seguindo a norma da ABNT (1996), os espaçamentos entre sementes foram classificados como aceitáveis, falhos e duplos, da seguinte maneira: o espaçamento de referência (Xref) foi determinado para cada densidade de semeadura real verificada e, após isso, multiplicou-se Xref por 0,5 para mensurar os espaçamentos duplos, e por 1,5 para mensurar os espaçamentos falhos.

ISBN 978-65-990392-6-3

Já, para avaliar a qualidade da distribuição longitudinal de plantas finais, no dia 23 de abril de 2025 (um dia antes da colheita), foi realizada a mensuração da distância entre plantas em duas linhas de 4,5 m por parcela experimental, com o auxílio de uma fita métrica. A partir disso, seguindo a norma da ABNT (1996), já descrita anteriormente, os espaçamentos entre plantas foram classificados como aceitáveis, falhos e duplos.

O coeficiente de variação (CV) dos espaçamentos entre sementes e plantas finais foi determinado após as avaliações da qualidade de distribuição das sementes e das plantas finais, a partir da Equação 1.

$$CV = \frac{S}{\overline{X}} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde: $CV =$ Coeficiente de variação dos espaçamentos entre sementes ou plantas (%); $S =$ Desvio padrão dos espaçamentos entre sementes ou plantas (cm); e $\overline{X}$ = Média dos espaçamentos entre sementes ou plantas (cm).

Com o auxílio do programa computacional Sisvar, os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA). Nos casos em que houve efeito significativo ($p<0,05$) para os tratamentos utilizados, foram feitas análises de regressão e, nos casos em que não foi verificado efeito significativo, os resultados serão apresentados por meio de gráficos de barras, visando apresentar as tendências obtidas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

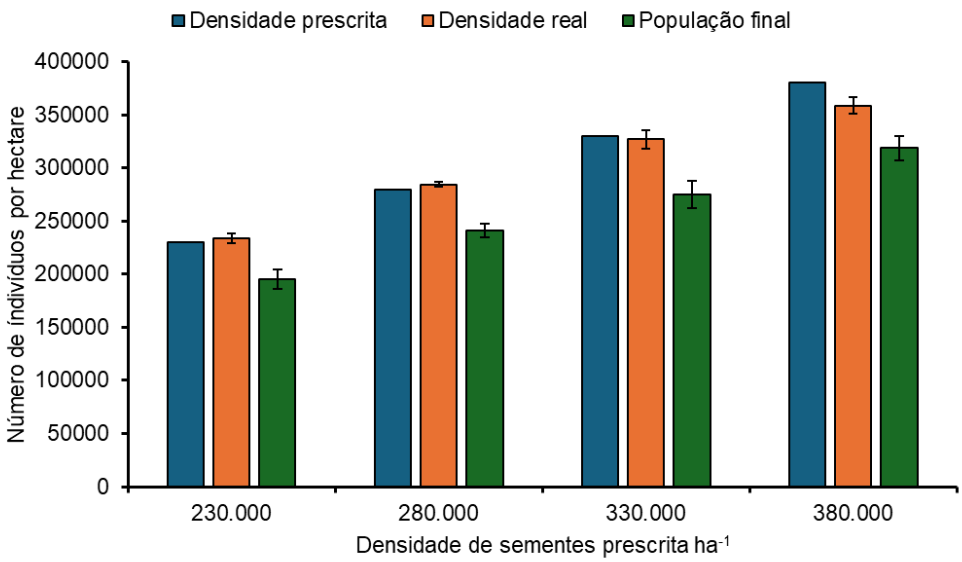
A comparação entre as densidades de sementes prescritas e as densidades reais contabilizadas (Figura 2) evidenciou que, até a taxa prescrita de 280.000 sementes ha^{-1}, a densidade real apresentou valores superiores. Por outro lado, a partir da taxa prescrita de 330.000 sementes ha^{-1}, observou-se a tendência de redução na densidade real. Em média, houve incremento de 4.235 sementes ha^{-1} (1,66%) nas prescrições de menor densidade (230.000 e 280.000 sementes ha^{-1}) e decréscimo de 12.237 sementes ha^{-1} (3,45%) nas prescrições de maior densidade (330.000 e 380.000 sementes ha^{-1}).

Nesta análise, a maior discrepância entre a densidade de sementes prescrita e densidade real ocorreu na taxa de semeadura mais elevada, o que evidencia a necessidade de critérios mais rigorosos no ajuste e na condução da operação quando se utilizam elevadas densidades de sementes. Trabalhando com diferentes densidades de sementes na cultura da soja, Dias et al. (2009) observaram resultados semelhantes a este, em que, com velocidade de trabalho de 5,5 km h^{-1}, as maiores densidades de semeadura não foram alcançadas. Vale destacar, no entanto, que o estudo citado foi realizado com uma semeadora-adubadora de precisão equipada com discos alveolados horizontais, distinta da utilizada no presente trabalho.

A população final de plantas, apresentada na Figura 2, foi inferior à taxa de semeadura prescrita em todos os tratamentos, com redução média de 47.438 plantas ha^{-1} (15,55%) em relação ao valor desejado. Nesta análise, nota-se ainda que, o aumento da densidade prescrita intensificou a diferença entre a taxa desejada e a população final de plantas obtida. Possivelmente, as diferenças entre densidade prescrita e população final de plantas estabelecida podem ser explicadas pelo potencial de germinação das sementes, de 95%, aliado à ocorrência de deficiência hídrica ao longo de todo o ciclo, que limitou a capacidade de sobrevivência e desenvolvimento de parte das plantas.

Figura 2 – Comparativo entre a densidade de sementes prescrita e a densidade de sementes real, bem como a população final de plantas obtida.

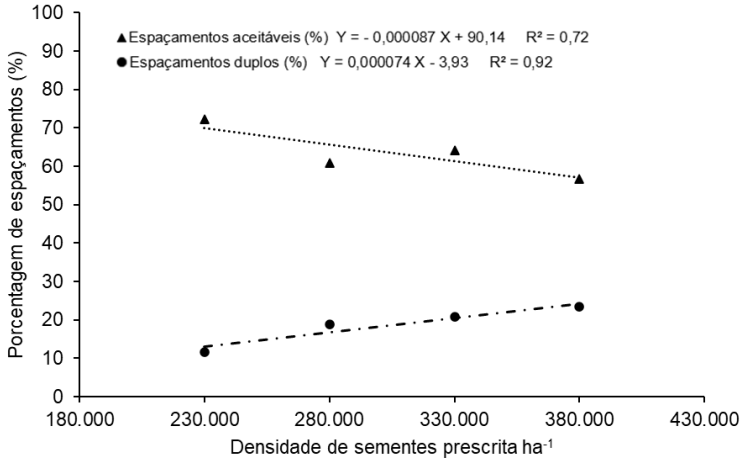
ISBN 978-65-990392-6-3



Legenda: Densidade prescrita - É a densidade de sementes planejada na prescrição de sementes. Densidade real - É a densidade de sementes contabilizada após a realização da semeadura do experimento. População final – É a população de plantas obtida no momento da colheita da cultura.
Fonte: Autores (2025)

Na análise da qualidade de distribuição longitudinal de sementes, foi encontrado efeito significativo para espaçamentos aceitáveis e duplos (Figura 3). Para espaçamentos aceitáveis, foi obtida equação linear com coeficiente angular negativo, indicando que conforme aumenta-se a densidade de sementes, a porcentagem de espaçamentos aceitáveis é reduzida. Já, para espaçamentos duplos, foi obtida uma equação linear com coeficiente angular positivo, indicando que conforme aumenta-se a densidade de sementes, a porcentagem de espaçamentos duplos aumenta. Resultados similares a estes foram encontrados por Carpes (2014).

Figura 3 – Porcentagem de espaçamentos aceitáveis e duplos entre sementes, em função da densidade de sementes prescrita na operação de semeadura.



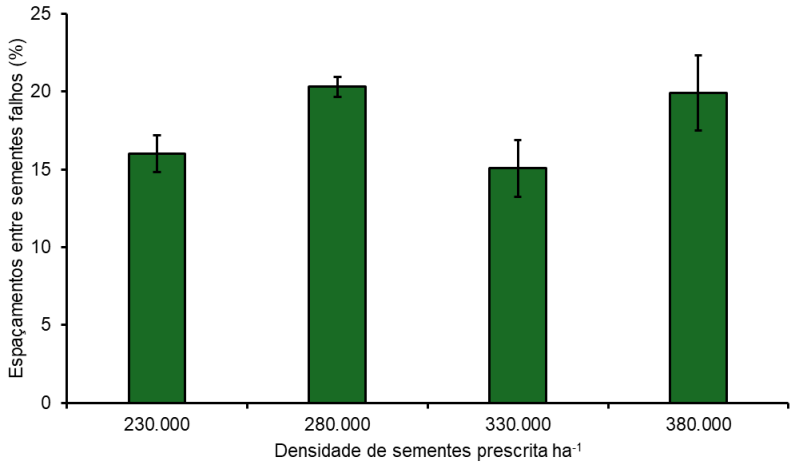
Fonte: Autores (2025)

Para a porcentagem de espaçamentos falhos entre sementes (Figura 4), não houve efeito significativo e não foi encontrada tendência bem definida em função das diferentes

ISBN 978-65-990392-6-3

densidades de sementes prescritas. De maneira geral, as maiores porcentagens de espaçamento falhos foram encontradas nas densidades prescritas de 280.000 e 380.000 sementes ha^{-1}, evidenciando que não houve relação direta entre as variáveis.

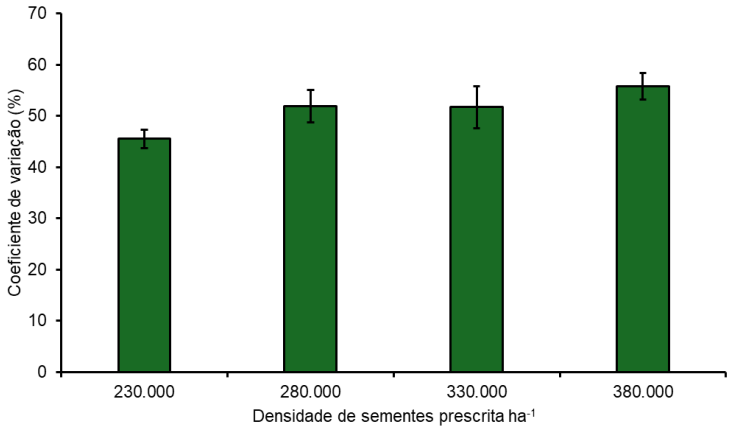
Figura 4 – Porcentagem de espaçamentos falhos entre sementes, em função da densidade de sementes prescrita na operação de semeadura.



Fonte: Autores (2025)

O CV dos espaçamentos entre sementes (Figura 5) não apresentou efeito significativo entre os tratamentos. Apesar disso, observou-se a tendência de aumento do CV com o incremento da densidade de sementes prescrita, indicando que a semeadora-adubadora promoveu maior variabilidade na distribuição de sementes quando foram utilizadas maiores taxas de semeadura. Em todos os tratamentos, os coeficientes de variação encontrados foram superiores ao limite de 30% estabelecido por Coelho (1996) para semeadoras pneumáticas.

Figura 5 – Coeficiente de variação de espaçamentos entre sementes, em função da densidade de sementes prescrita na operação de semeadura.



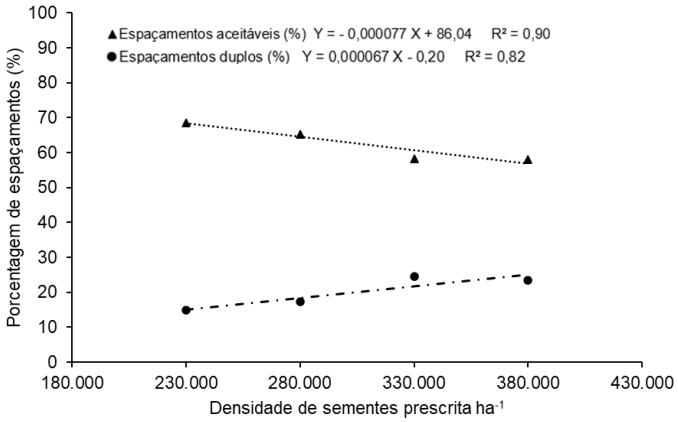
Fonte: Autores (2025)

Na análise da qualidade de distribuição longitudinal de plantas, foi encontrado efeito significativo para espaçamentos aceitáveis e duplos (Figura 3). Para espaçamentos aceitáveis, foi obtida equação linear com coeficiente angular negativo indicando que, conforme aumenta-se a densidade de sementes prescrita e, consequentemente, a população de plantas estabelecida, a porcentagem de espaçamentos aceitáveis entre plantas é reduzida. Já para espaçamentos duplos, foi obtida equação linear com coeficiente angular positivo, indicando que

ISBN 978-65-990392-6-3

conforme aumenta-se a densidade de sementes prescrita, a porcentagem de espaçamentos duplos entre plantas aumenta.

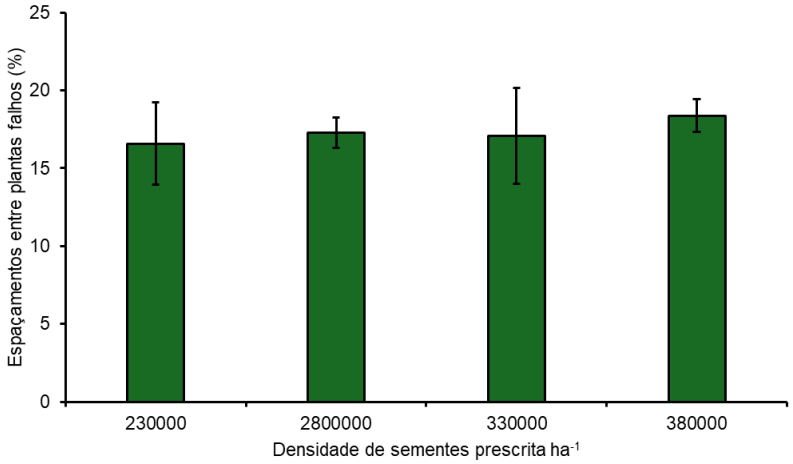
Figura 6 - Porcentagem de espaçamentos aceitáveis e duplos entre plantas finais, em função da densidade de sementes prescrita na operação de semeadura.



Fonte: Autores (2025)

Para a porcentagem de espaçamentos falhos entre plantas (Figura 7), não houve efeito significativo, mas foi encontrada a tendência de aumento na porcentagem de espaçamentos falhos com o incremento da densidade de sementes prescrita. De maneira geral, as maiores porcentagens de espaçamento falhos entre plantas foram encontradas, em ordem crescente, nas densidades prescritas de 280.000, 330.000 e 380.000 sementes ha^{-1}.

Figura 7 - Porcentagem de espaçamentos falhos entre plantas, em função da densidade de sementes prescrita na operação de semeadura.

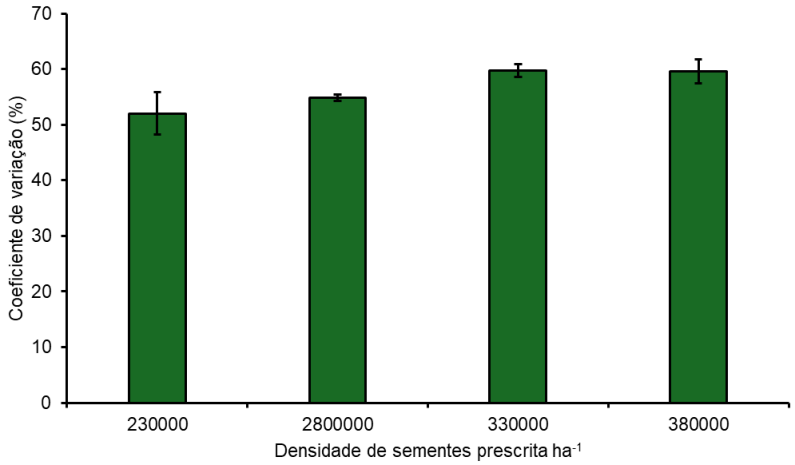


Fonte: Autores (2025)

O CV dos espaçamentos entre plantas (Figura 8) também não apresentou efeito significativo entre os tratamentos. Entretanto, observou-se a tendência de aumento do CV dos espaçamentos entre plantas com o incremento da densidade de sementes prescrita. De maneira geral, o CV médio dos espaçamentos entre plantas foi de 56,6%, sendo superior ao CV observado nos espaçamentos entre sementes, com média geral de 51,2%. Esse resultado possivelmente está relacionado às características das sementes utilizadas e às condições de déficit hídrico da safra, que reduziram a população de plantas em relação ao que foi planejado na prescrição.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 8 – Coeficiente de variação de espaçamentos entre plantas, em função da densidade de sementes prescrita na operação de semeadura.



Fonte: Autores (2025)

De maneira geral, na avaliação da qualidade da distribuição longitudinal, foram encontradas tendências de resultados semelhantes para sementes e plantas finais. Em todas as avaliações observou-se que, embora as tecnologias embarcadas em semeadoras-adubadoras estejam em constante avanço, conforme exemplificado pelo implemento utilizado neste estudo, o uso de maiores densidades de sementes tendeu a prejudicar a qualidade da distribuição de sementes e plantas finais.

4 CONCLUSÃO

Nas condições em que este estudo foi conduzido, prescrições entre 230.000 e 280.000 sementes ha^{-1} tendem a promover maior densidade de sementes reais depositadas, enquanto prescrições entre 330.000 e 380.000 sementes ha^{-1} tendem a reduzir a densidade de sementes reais depositadas, em relação ao valor desejado.

A porcentagem de espaçamentos aceitáveis entre sementes e plantas finais diminui de forma linear com o aumento da densidade de sementes prescrita. Por outro lado, a porcentagem de espaçamentos duplos entre sementes e plantas finais aumenta linearmente à medida que a densidade de sementes prescrita se eleva.

Diferentes densidades de semeadura não apresentam efeito significativo sobre o CV e os espaçamentos falhos entre sementes e plantas. Contudo, observa-se a tendência de que maiores densidades promovam maior porcentagem de espaçamentos falhos e aumento do CV.

REFERÊNCIAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Projeto de norma 12:02.06-004:** semeadora de precisão: ensaio de laboratório. São Paulo: Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, 1996.

ALVARES, C.A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22, 711–728.2013.

CALONEGO, J. C. et al. Produtividade e crescimento de milho em diferentes arranjos de plantas. **Agrarian**, Dourados, v.4, n.12, p.84-90, 2011.

ISBN 978-65-990392-6-3

CARPES, D. P. **Distribuição longitudinal de sementes de milho e soja em função do tubo condutor, mecanismo dosador e densidade de semeadura.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) -Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7575/CARPES,%20DAUTO%20PIVETT A.pdf. Acesso em: 01 set. 2025.

COELHO, J. L. D. Ensaio e certificação das máquinas para a semeadura. In: MIALHE, L. G. **Máquinas Agrícolas**: ensaios e certificação. Piracicaba, SP: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1996.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira** - Grãos: 12º Levantamento de grãos - Safra 2024/25, 2025.

CORASSA, G. M. et al. Planter Technology to Reduce Double-Planted Area and Improve Corn and Soybean Yields. **Agronomy Journal,** v. 110, n. 1, p. 300–310, 2018a.

CORASSA, G. M. et al. Optimum Soybean Seeding Rates by Yield Environment in Southern Brazil. **Agronomy Journal,** v. 110, n. 6, p. 2430–2438, 2018b.

COX, W. J.; CHERNEY, J. H. Growth and yield responses of soybean to row spacing and seeding rate. **Agronomy Journal**, v. 103, p. 128, 2011.

DIAS, V. de O., *et al*. Distribution of corn and soybean seeds in function of the sowing speed and density. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 6, p. 1728–1734, 2009.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja –** Região Central do Brasil 2013. Londrina: Embrapa.

HAMMAN, W. P., et al. Comparison of variable-rate prescriptions and optimum seeding rate in soybean. **Crop, Forage & Turfgrass Management**, v. 7, 2021.

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. **Banco de Dados Meteorológicos**, 2025. Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/. Acesso em: 02 set. 2025.

MARONI, J. et al. Velocidad de emergencia del maíz: prestaciones de diferentes órganos para el contactado semilla-suelo durante la siembra. In: BARBOSA, O.A. (ed.). **Avances em ingeniería agrícola**, 2003-2005. San Luis: CADIR 2005, 2005. p. 9-14.

MASINO, A., et al. Spatial and temporal plant-to-plant variability effects on soybean yield. **European Journal of Agronomy,** v. 98, 2018. p. 24–32.

MARTIN, T. N., et al. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, safras 2022/2023 e 2023/2024**, 136 p., 2022.

MOURTZINIS, S., et al. Planting method and seeding rate effect on whole and partitioned soybean yield. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 4, 2021.

ISBN 978-65-990392-6-3

ONU BRASIL. **Relatório da ONU pede mudanças na forma como o mundo produz e consome alimentos.** Brasília, 19 jul. 2019. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/83759-relat%C3%B3rio-da-onu-pede-mudan%C3%A7as-na-forma-como-o-mundo-produz-e-consome-alimentos. Acesso em: 15 ago. 2025.

PRUSINSKI, J.; NOWICKI, R. Effect of planting density and row spacing on the yielding of soybean (Glycine max L. Merrill). **Plant, Soil and Environment**, v. 66, 2020. p. 623.

SANGOI, L. et al. Efeitos da distribuição espacial de plantas na produtividade de grãos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo,** v. 19, e1173, 2020.

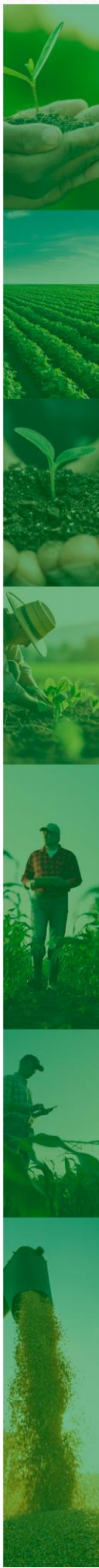
SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos.** Brasília, Embrapa Solos. 356p. 2018.

VERSENDAAL, E. van et al. Soybean yield and seed quality in equidistant versus non-equidistant plant arrangements under different densities. **Crop Science**, v. 65, 2024.

XU, C. et al. Responses of branch number and yield component of soybean cultivars tested in different planting densities. **Agriculture**, v. 11, 2021.

ZHAO, Y. et al. Information conveyed by management zones and optimal soybean seeding rate. **Agronomy Journal**, v. 116, 2023. p. 301.

ISBN 978-65-990392-6-3



ÁREA TEMÁTICA: DESCRIÇÃO DE CASO TÉCNICO e/ou RELATO DE EXPERIÊNCIA

CAPÍTULO 82

USO DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA NO CONTROLE BIOLÓGICO DE *Thaumastocoris peregrinus*

Use of remotely piloted aircraft in the biological control of Thaumastocoris peregrinus

Modalidade: Descrição de Caso Técnico

Norton Borges Junior[1,3]; Lúcio de Paula Amaral[1,4]; Leonardo Rodrigues Barbosa[5]; Vagner dos Santos Machado[6]; Franciele da Silveira Gomes[6]; Flaiane Catarine da Rosa[2]; Franco Freitas Quevedo[3]; Adriano Arrué Melo[1]

[1]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal – Universidade Federal de Santa Maria/UFSM, Avenida Roraima n.º 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria — RS, Brasil, amaralufsm@gmail.com, norton.borges@cmpc.com, adrianoarrue@hotmail.com

[2]Eng. Florestal, UFSM, Avenida Roraima n.º 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria — RS, Brasil, flaianecatarine@hotmail.com

[3]CMPC Brasil, R. São Geraldo n.º 1680, CEP: 92703-470, Guaíba — RS, Brasil, norton.borges@cmpc.com, franco.quevedo@cmpc.com

[4]Programa de Pós-graduação em Agricultura de Precisão - Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria/UFSM, Avenida Roraima n.º 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria — RS, Brasil, amaralufsm@gmail.com

[5]Embrapa Florestas, Estr. Da Ribeira, Km 111, CEP: 83411-000, Colombo — PR, Brasil, leonardo.r.barbosa@embrapa.br

[6]Mensura Serviços Florestais Ltda, Avenida Marechal Castelo Branco, n.º 2945, CEP: 92700-790, Guaíba — RS, Brasil, terceiro.vagner.machado@cmpcrs.com.br, tereiro.franciele.gomes@cmpcrs.com.br

RESUMO

A eucaliptocultura é amplamente difundida em âmbito nacional e mundial, sendo um dos principais gêneros plantados para diversos usos como por exemplo a produção de celulose, energia e indústria moveleira. A produtividade dos plantios depende de diversos fatores, como material genético, silvicultura, tipo de solo, condições ambientais e o manejo de pragas e doenças. O *Thaumastocoris peregrinus*, conhecido como percevejo-bronzeado, está entre as cinco principais pragas do eucalipto no Brasil. Dentre as estratégias de manejo do *T. peregrinus*, destaca-se o uso da vespa *Cleruchoides noackae*, introduzida no Brasil em 2012. Para realizar a liberação deste agente de controle biológico, fitas de papel (200 x 20 mm) contendo aproximadamente 300 posturas de percevejo-bronzeado parasitadas por *C. noackae,* foram inseridas em cápsulas biodegradáveis (60 x 32 mm). Foram testadas duas formas de liberação: manual e aeronave remotamente pilotada (ARP) e duas quantidades de cápsulas liberadas por hectare. A liberação de 5 e 10 cápsulas por hectare apresentou dispersão do parasitoide em até 40 metros de distância e 15 metros de altura. O uso do ARP aumentou 24% a dispersão e reduziu o tempo de liberação do C. noackae em 41%.

Palavras-chave: Drone; Manejo Integrado de Pragas; Silvicultura de Precisão.

ABSTRACT

Eucalyptus cultivation is widespread nationally and globally, being one of the main planted genera for various uses such as cellulose production, energy, and the furniture industry. Plantation productivity depends on several factors, including genetic material, silviculture, soil type, environmental conditions, and

ISBN 978-65-990392-6-3

pest and disease management. *Thaumastocoris peregrinus*, known as the bronze bug, is among the five main eucalyptus pests in Brazil. Among the management strategies for *T. peregrinus*, the use of the wasp *Cleruchoides noackae*, introduced to Brazil in 2012, stands out. To release this biological control agent, paper strips (200 x 20 mm) containing approximately 300 bronze bug egg masses parasitized by *C. noackae* were inserted into biodegradable capsules (60 x 32 mm). Two release methods were tested: manual and remotely piloted aircraft (RPA), with two quantities of capsules released per hectare. The release of 5 and 10 capsules per hectare resulted in parasitoid dispersal up to 40 meters in distance and 15 meters in height. The use of the RPA increased dispersal by 24% and reduced the release time of *C. noackae* by 41%.

Keywords: Drone; Integrated Pest Management; Precision Forestry.

1 INTRODUÇÃO

A eucaliptocultura desempenha um papel importante na economia brasileira, contribui para o desenvolvimento socioeconômico, além de ser fonte de matérias-primas para indústrias de celulose, energia e painéis de madeira (FONTAN et al., 2016). De acordo com SOUZA et al. (2024), a clonagem de árvores tem sido um dos principais fatores responsáveis pela expansão das áreas de cultivo de eucalipto. Todavia, essa forma de propagação resulta em povoamentos homogêneos, nos quais as plantas compartilham características semelhantes, condição que favorece a ocorrência de pragas que acometem a cultura.

O *Thaumastocoris peregrinus* Carpintero & Dellapé (Hemiptera, Thaumastocoridae), conhecido popularmente como percevejo-bronzeado, é um inseto sugador de seiva e foi introduzido no Brasil no ano de 2008, causando muitos prejuízos para os plantios de eucalipto (EMBRAPA, 2021). O inseto tornou-se uma série ameaça a produtividade dos plantios de eucalipto em vários países nas regiões climáticas do sul da África, América do Sul, sul da Europa e Nova Zelândia (Jacobs e Neser 2005; Carpintero e Dellapé 2006; Laudonia e Sasso 2012; Sopow et al., 2012).

No Brasil, o percevejo-bronzeado foi considerado a segunda principal praga após o seu surgimento. Por esta razão, a espécie *Cleruchoides noackae* Lin & Huber (Hymenoptera: Mymaridae), foi introduzida no Brasil em 2012, sendo o principal agente de controle que parasita os ovos do percevejo-bronzeado (BARBOSA et al., 2017). A utilização de controle biológico tem se mostrado uma alternativa sustentável frente ao controle químico. Este controle visa o estabelecimento permanente do inimigo natural, para possibilitar o controle de pragas a longo prazo (BARBOSA et al., 2021). Diversos estudos têm investigado tanto a produção de *C. noackae* em grande escala, quanto sua eficiência de liberação em campo.

O uso de Aeronave remotamente pilotada (ARP) vem ganhando espaço no setor agrícola e florestal. Atualmente os principais usos são para a geração de imagens aéreas processadas com aprendizado profundo e inteligência artificial gerando mapas de infestação de plantas daninhas, inventário de sobrevivência de plantas, estimativas de crescimento e produção de madeira, diagnóstico nutricional de plantas e liberação de agentes de controle biológico, particularmente em áreas remotas que são de difícil ou perigoso acesso para humanos (FERNANDES et al., 2025; RICHTER et al., 2025; SILVA et al., 2024; SILVA et al., 2025; LAKE et al., 2021).

Torna-se pertinente verificar o emprego de tecnologias para aprimorar a liberação e dispersão do parasitoide de ovos *C. noackae*, como o uso de aeronaves remotamente pilotadas (ARP). Esta estratégia tem o potencial de otimizar recursos, reduzir o tempo e ampliar a área de cobertura do controle biológico, promovendo uma maior eficácia no manejo de pragas. Nesse

ISBN 978-65-990392-6-3

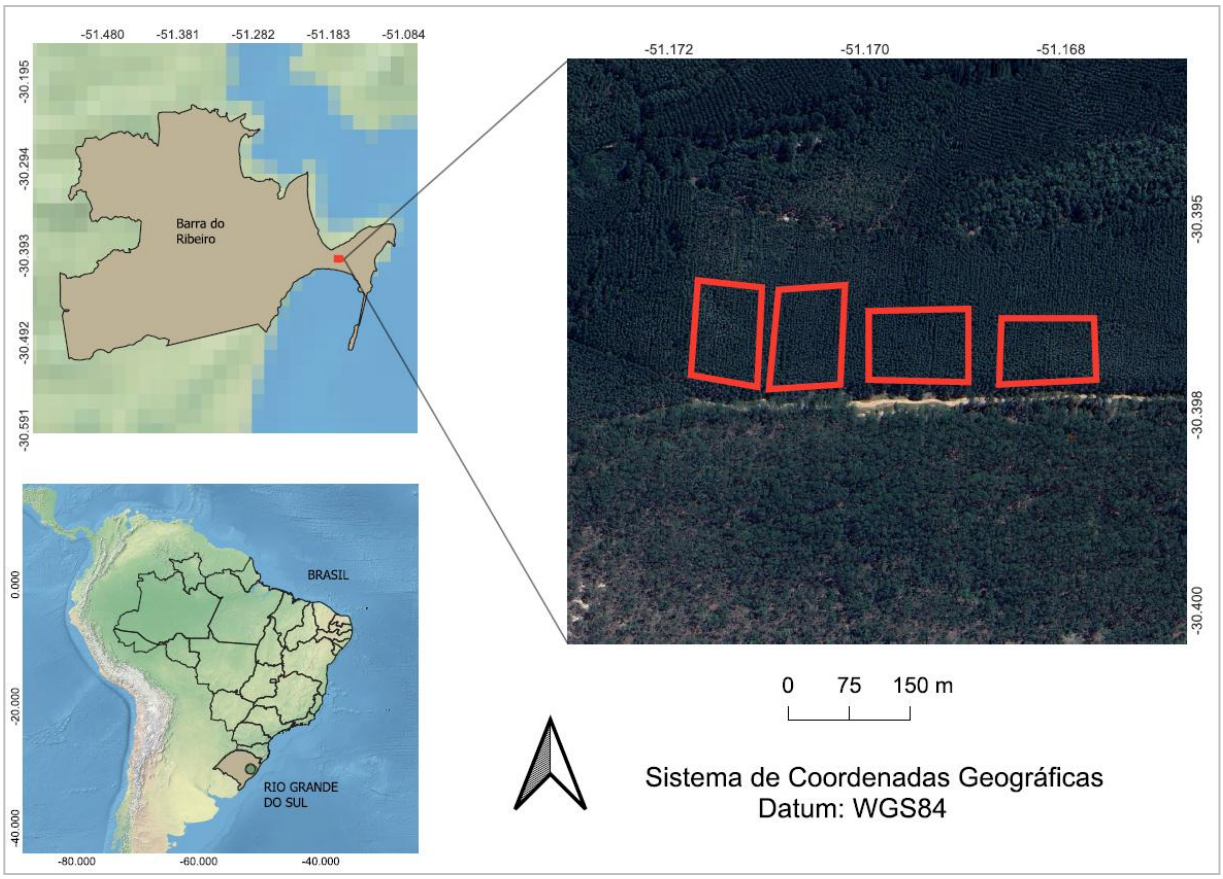
sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência da liberação de *C. noackae* com uso de ARP no controle biológico de *T. peregrinus.*

2 DESCRIÇÃO DE CASO TÉCNICO

A pesquisa foi realizada em um plantio comercial de eucalipto com quatro anos de idade, localizado no município de Barra do Ribeiro, estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). O reflorestamento de um híbrido entre *E. urophylla* x *E. grandis*, plantado no espaçamento de 3,5 x 2,14 metros, pertence a empresa Cmpc, maior fabricante de celulose no Estado e umas das maiores produtoras a nível mundial. O clima da região é classificado como subtropical úmido (Cfa) de acordo com o sistema de classificação de Köppen (Alvares et al., 2013), com temperatura média anual superior a 18°C e precipitação média anual em torno de 1650 mm (ANA, 2006).

Previamente a realização do experimento, foram instaladas nove fitas com ovos sentinelas de *T. peregrinus* em cada tratamento. As fitas foram fixadas em árvores equidistantes e recolhidas após sete dias. Estas foram inseridas em tubos de poliestireno (50 x 20 mm) e mantidas por 15 dias em temperatura de 24ºC e umidade relativa de 60%. Aos 15 dias, verificou-se que não houve emergência de parasitoides nas fitas com ovos sentinelas.

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Autores (2025).

Confirmada a inexistência de parasitoides, foi realizado o experimento com quatro tratamentos, sendo liberação manual de 5 e 10 cápsulas contendo parasitoides e liberação com ARP de 5 e 10 cápsulas. Cada liberação foi realizada em uma área de 1 ha. A liberação manual seguiu a mesma distribuição das cápsulas usadas para a ARP. Foi utilizada uma aeronave X800

ISBN 978-65-990392-6-3

BIO para dispenser de cápsulas do tipo hexacóptero com controle manual, voo automatizado programável e autonomia de 30 minutos (Figura 2). Os voos foram executados com a ARP contendo um dispenser com capacidade de 100 cápsulas para a liberação, com peso total de decolagem de 5 Kg, velocidade de voo de 5 m/s e altura de 50 metros.

Figura 2. Drone X800 com dispenser de cápsulas e indivíduo adulto de *Cleruchoides noackae* parasitando ovos de *Thaumastocoris peregrinus*.



Fonte: Autores (2025).

Previamente foram planejados os voos para cada tratamento através do Sofware X Mission versão 3.0, utilizando o mapa de cada área e definindo o número de cápsulas a serem liberadas. Posteriormente as liberações, em cada tratamento foram colocadas nove fitas de papel dispostas nos sentidos leste-oeste e norte-sul, com ovos frescos de *Thaumastocoris peregrinus* (Figura 3).

Figura 3. Indivíduo adulto de *Thaumastocoris peregrinus* e cápsula de liberação.



Fonte: Autores (2025).

As fitas foram fixadas equidistantes entre si em árvores a 1,8 metros do solo. Ainda, foram instaladas 2 fitas distantes 5, 10, 20 e 40 metros da cápsula central de cada tratamento, uma fita à 1,8 metros e outra fita à 15 metros do nível do solo. Três dias após a liberação, as fitas foram

ISBN 978-65-990392-6-3

retiradas e acondicionadas em tubos de poliestireno (50 x 20 mm) e mantidas por 15 dias em temperatura de 24ºC e umidade relativa de 60% para avaliação da emergência de parasitoides.

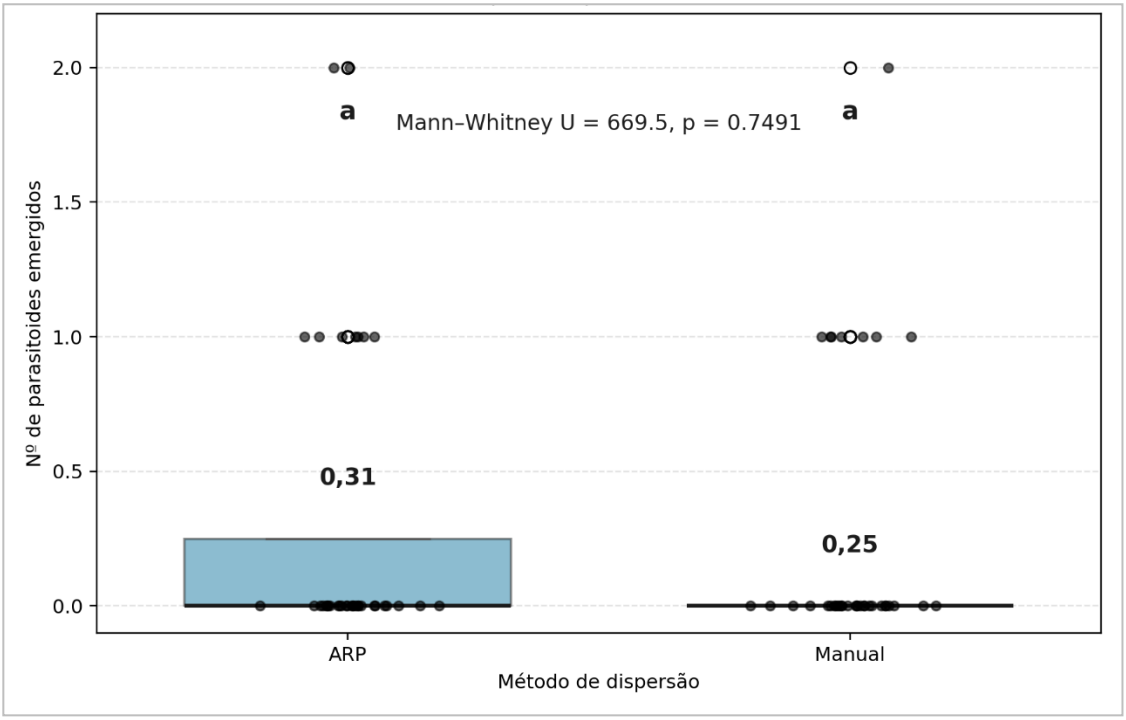
As cápsulas liberadas em campo (Figura 3) foram recolhidas e avaliou-se em laboratório se haviam parasitoides, com o objetivo de verificar eventual restrição das embalagens para o controle biológico. Foram avaliados o tempo gasto para a liberação e também o número de parasitoides emergidos em cada tratamento. Empregou-se o teste de Mann–Whitney para comparação entre os métodos de liberação, o teste de Mann-Whitney e Fisher para avaliação entre a quantidade de cápsulas liberadas por hectare, o teste de Kruskal–Wallis para análise entre diferentes distâncias em relação as cápsulas de liberação e o teste de Mann-Whitney para identificação de diferença significativa entre diferentes alturas em relação a liberação.

Em relação ao tempo gasto em cada tratamento, observou-se que a liberação de *C. noackae* (Figura 2) com a ARP apresentou um rendimento 41% superior a liberação dos parasitoides de forma manual. Foram 11,3 minutos por hectare na liberação com ARP e 16 minutos por hectare na liberação manual.

O aumento de rendimento com o uso de ARP é de suma importância pois acelera o processo de controle biológico, favorecendo o controle da praga, além de incrementar a área efetiva com dispersão do parasitoide. Para NUNES (2023) as vantagens do uso de ARP incluem economia de custos e tempo, melhoria na coleta e análise de dados, aprimoramento do manejo de culturas e maior segurança para os trabalhadores.

Com relação ao número de parasitoides emergidos nas fitas, a liberação com ARP foi 24% superior a liberação manual (Figura 5). A emergência média de parasitoides na liberação manual foi 0,25 insetos por fita, enquanto na liberação com ARP a média foi 0,31 parasitoides por fita recolhida, não havendo diferença estatística pelo teste Mann-Whitney (p = 0,7491).

Figura 5. Emergência de parasitoides em cada método de liberação.



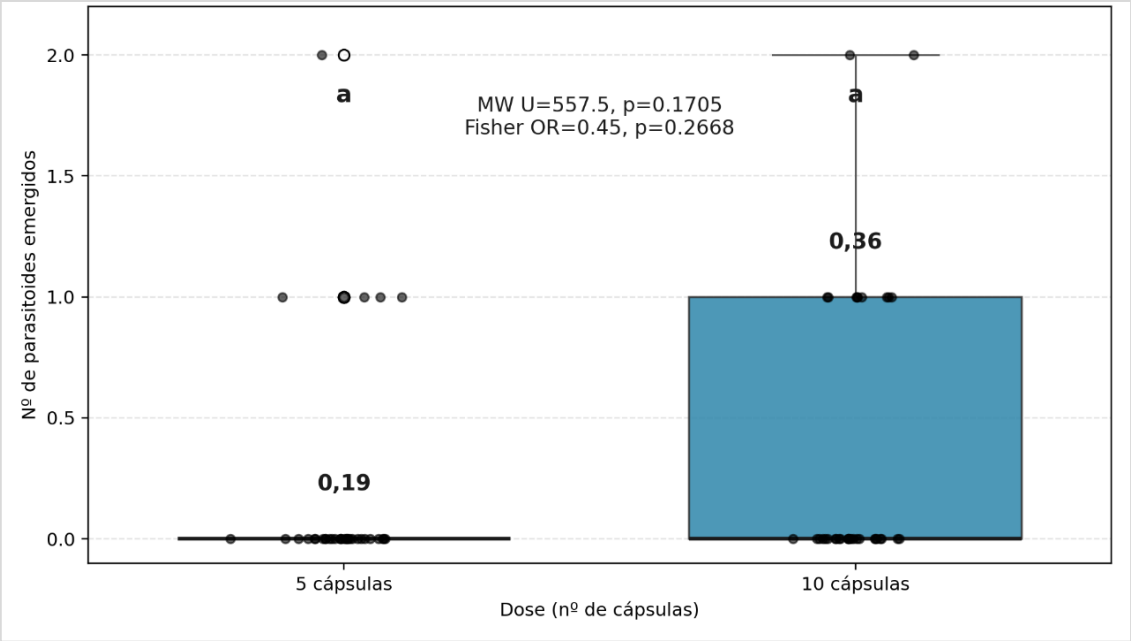
Fonte: Autores (2025).

A baixa emergência de parasitoides pode estar relacionada com a distância entre as fitas com as cápsulas, que variou entre 3 a 55 metros. Uma alternativa para reduzir a distância seria

ISBN 978-65-990392-6-3

aumentar o número de cápsulas liberadas por hectare. Conforme a Figura 6, observou-se maior emergência nos tratamentos com a liberação de 10 cápsulas por hectare com média de 0,36 parasitoides emergidos por fita contra 0,19 nos tratamentos com 5 cápsulas por hectare.

Figura 6. Emergência de parasitoides em diferentes quantidades de cápsulas liberadas por hectare.



Fonte: Autores (2025).

Apesar de termos observado um maior percentual de parasitismo dos ovos, não houve diferença significativa pelos testes Mann-Whitney (p = 0,1705) e Fisher (p = 0,2668) nas quantidades de cápsulas liberadas por hectare.

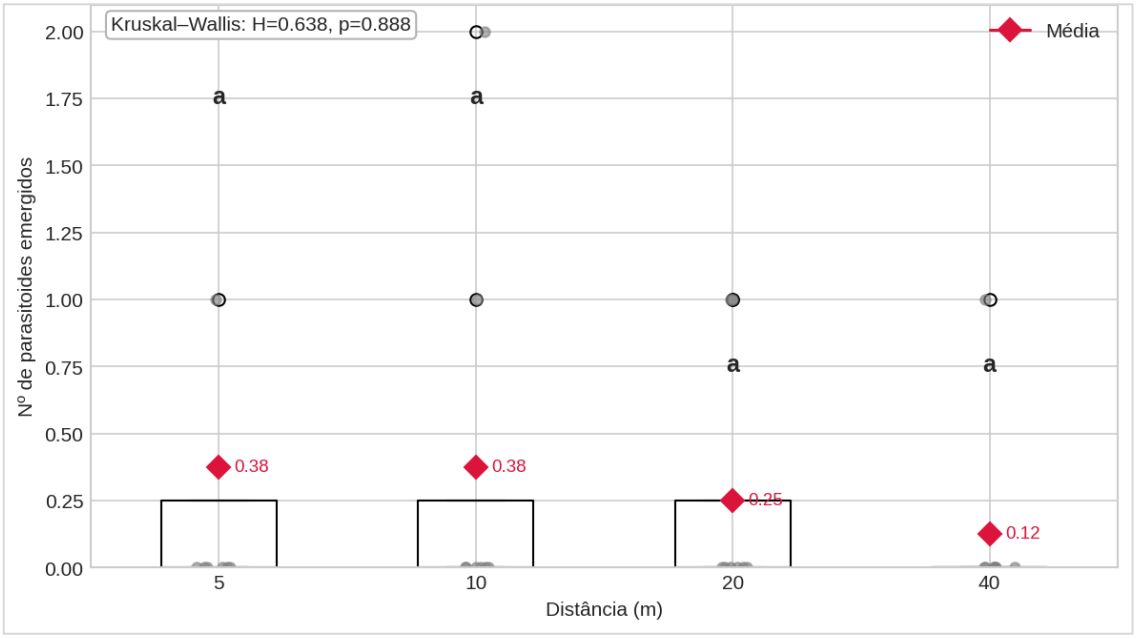
Os resultados obtidos da distância das posturas instaladas nas árvores em relação as cápsulas liberadas, indicaram maiores emergências nas distâncias de 5 e 10 metros, com média de 0,38 parasitoides emergidos por fita, 0,25 na distância de 20 e 0,12 na distância de 40 metros (Figura 7).

Conforme a Figura 8, houve maior emergência de parasitoides na altura de 15 metros com média de 0,38 parasitoides emergidos por fita, do que na altura de 1,8 m com 0,19 parasitoides. Este resultado é contundente pois a maioria das posturas estão na copa das árvores, geralmente entre 15 a 20 metros de altura, confirmando que a liberação das cápsulas com ARP no solo não deve interferir na taxa de parasitismo. Não houve diferença significativa entre as alturas pelo teste Mann-Whitney (p = 0,25).

Outro fator que poderia ter influenciado a emergência reduzida de insetos foram as condições climáticas. Durante os três dias entre a liberação e a coleta das fitas para avaliação de emergência, a temperatura mínima vaiou entre 15,5 a 17,8 °C, enquanto as máximas variaram entre 27,9 a 28,6 °C. Conforme SOUZA et al. (2016), as temperaturas ideais para a criação do parasitoide estão entre 15 a 25 °C, portanto as condições de liberação estavam próximas das condições ideais para a espécie.

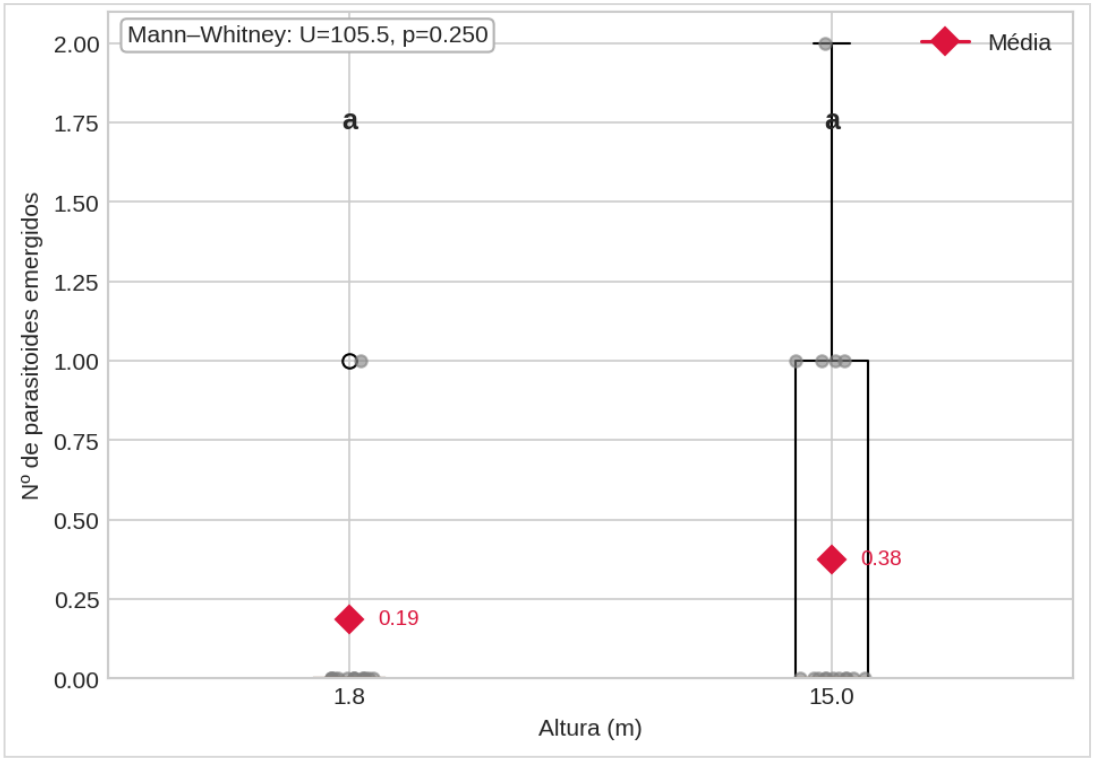
ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 7. Emergência de parasitoides à diferentes distâncias da liberação.



Fonte: Autores (2025).

Figura 8. Emergência de parasitoides à diferentes alturas da liberação.



Fonte: Autores (2025).

Com relação a avaliação das cápsulas utilizadas, verificou-se que nenhuma embalagem continha parasitoides, indicando que as cápsulas foram adequadas para a liberação. Estes são os primeiros resultados do uso de ARP para a liberação massal de *C. noackae*, um parasitoide de ovos que possui poucos estudos sobre sua interação com o clima e com o seu hospedeiro *T.*

ISBN 978-65-990392-6-3

peregrinus. Assim, novos estudos são necessários para elucidar lacunas como diferentes métodos de liberação com ARP e confirmar os resultados deste trabalho.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O manejo integrado de pragas necessita realizar a implementação das novas tecnologias para aumentar a eficiência de métodos tradicionais como por exemplo o uso de agentes de controle biológico. Este estudo demonstrou ser viável o emprego de ARP na distribuição de cápsulas contendo parasitoides, com ganhos no rendimento da atividade e também no controle da praga. Resultados promissores para ganhos em escala em extensas áreas reflorestadas, utilizando sistemas modernos, automatizados, rastreáveis e com redução de custos operacionais, avançando na silvicultura de precisão.

AGRADECIMENTOS

A empresa CMPC pela disponibilização da área de estudo.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. *et al*. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift,** v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507

BARBOSA, L. R. *et al*. Controle biológico no MIP florestal. In: LEMES, P. G.; ZANUNCIO, J. C (ed.) **Novo manual de pragas florestais brasileiras**. Montes Claros, UFMG, 2021, cap. 10, p. 147-163. Disponível em: https://www.ipef.br/publicacoes/novo-manual-de-pragas-florestais-brasileiras/Novo_Manual_de_Pragas_Florestais_Brasileiras.pdf

BARBOSA, L. R. *et al*. Establishment in the Field of *Cleruchoides noackae* (Hymenoptera: Mymaridae), an Exotic Egg Parasitoid of *Thaumastocoris peregrinus* (Hemiptera: Thaumastocoridae). **Florida Entomological Society**, Gainesville, v. 100, n. 2, p. 372-374, 2017. Disponível em: http://www.bioone.org/doi/full/10.1653/024.100.0237.

CARPINTERO D.L., DELLAPÉ P.M. A new species of Thaumastocoris Kirkaldy from Argentina (Heteroptera: Thaumastocoridae: Thaumastocorinae). **Zootaxa**, 1228: 61 – 68, 2006. Disponível em: https://biotanz.landcareresearch.co.nz/references/3ce5dda4-c28b-41f5-95be-e42b7f2778d2

EMBRAPA FLORESTAS. Controle biológico do percevejo bronzeado (*Thaumastocoris peregrinus*): ênfase na criação massal do parasitoide (*Cleruchoides noackae*) e monitoramento da eficiência no campo. **Embrapa Florestas**, 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/215046/controle-biologico-do-percevejo-bronzeado--ithaumastocoris-peregrinusi-enfase-na-criacao-massal-do-parasitoide--icleruchoides-noackaei-e-monitoramento-da-eficiencia-no-campo

FERNANDES, P. *et al*. Use of hyperspectral sensor and random forest for broadleaf and narrowleaf weed differentiation. **New Forests**, v. 56:46, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s11056-025-10113-w

ISBN 978-65-990392-6-3

FONTAN, I. C. I.; MOREIRA NETO, M. M. A.; DIAS, S. C. M. População e sintomas de *Thaumastocoris peregrinus* (Hemiptera: Thaumastocoridae) em plantas de eucalipto. ***Revista Univap***, São José dos Campos, v. 22, n. 40, p. 184, dez. 2016. DOI: 10.18066/revistaunivap.v22i40.774. Disponível em: https://revista.univap.br/index.php/revistaunivap/article/view/774.

JACOBS, D.H., NESER, S. *Thaumastocoris australicus* Kirkaldy (Heteroptera: Thaumastocoridae): a new insect arrival in South Africa, damaging to *Eucalyptus* trees: research in action, **South African Journal of Science**. Johannesburg, v. 101, n. 5, p. 233-236, 2005. Disponível em: https://journals.co.za/doi/10.10520/EJC96411

LAKE, E. C. *et al*. First drone releases of the biological control agente *Neomusotima conspurcatalis* on Old World climbing fern. **Biocontrol Science and Technology**, v. 31(1), p. 97–106. https://doi.org/10.1080/09583157.2020.1828280

LAUDONIA, S., SASSO R. The bronze bug *Thaumastocoris peregrinus*: a new insect recorded in Italy, damaging to *Eucalyptus* trees. **Bull Insectol,** 65 (1): p. 89 – 93, 2012. Disponível em: https://www.academia.edu/66316943/The_bronze_bug_Thaumastocoris_peregrinus_a_new_insect_recorded_in_Italy_damaging_to_Eucalyptus_trees

NUNES, E. C. Employing drones in agriculture: an exploration of various drone types and key advantages. **arXiv preprint arXiv:2307.04037**, 2023. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2307.04037

RICHTER V. *et al*. UAV-based spectral images using remote sensing and YOLOv8 in *Eucalyptus saligna* Sm. Inventory. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 35, e88522, p. 1-25, 2025. https://doi.org/10.5902/1980509888522

SILVA, B.R.F.d. *et al*. Using Drones for Dendrometric Estimations in Forests: A Bibliometric Analysis. **Forests**, v. 15, 1993, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/f15111993

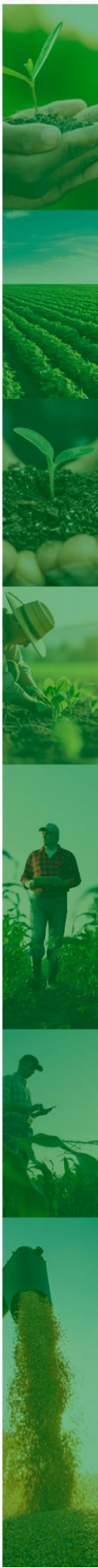
SILVA, S.D.P.d. *et al*. Remote sensing by spectroradiometry applied to nutritional diagnosis in *Eucalyptus saligna* Smith. **Revista Observatorio de la Economia Latinoamericana**, Curitiba, v. 23, n. 8, p. 01-25. 2025. DOI: 10.55905/oelv23n8-070. Disponível em: https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/11053

SOUSA, G. P. de; MOURA, J. Z. de; SILVA, M. C. F.; SANTOS, P. B. dos; SILVA, A. C.; SOUSA, H. C. P. de. Incidence by *Thaumastocoris peregrinus* (Hemiptera: Thaumastocoridae) and *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) in eucalyptus clones. ***Research, Society and Development***, [S. l.], v. 13, n. 4, p. e10413445628, 2024. DOI: 10.33448/rsd-v13i4.45628. Disponível em: https://rsdjournal.org/rsd/article/view/45628.

SOUZA, A. R. d. *et al*. Longevity of *Cleruchoides noackae* (Hymenoptera: Mymaridae), an egg parasitoid of *Thaumastocoris peregrinus* (Hemiptera: Thaumastocoridae), with various honey concentrations and at several temperatures. **Florida Entomologist**, V. 99 (1), 2016. DOI: https://doi.org/10.1653/024.099.0107

ISBN 978-65-990392-6-3

SOPOW S., GEORGE S., WARD N. Bronze Bug, *Thaumastocoris peregrinus*: a new *Eucalyptus* pest in New Zealand. **Surveillance**, 39 (2): p. 43 – 46, 2012. Disponível em: https://www.academia.edu/12214105/Bronze_Bug_Thaumastocoris_peregrinus_A_new_Eucalyptus_pest_in_New_Zealand



ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 83

USO DE VANT NA AVALIAÇÃO DE SOBREVIVÊNCIA DE MUDAS DE *Eucalyptus* sp.

Use of VANT in assessing the survival of Eucalyptus sp. seedlings

Modalidade: Descrição de Caso Técnico

Norton Borges Junior[1,3]; Lúcio de Paula Amaral[1,4]; Igor G. L. M. V. de Souza[5]; Denis Santos da Silveira[5]; Flaiane Catarine da Rosa[2]; Franco Freitas Quevedo[3]; Adriano Arrué Melo[1]; Vagner dos Santos Machado[6]

[1] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal – Universidade Federal de Santa Maria/UFSM, Avenida Roraima n.º 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria — RS, Brasil, amaralufsm@gmail.com, norton.borges@cmpc.com, adrianoarrue@hotmail.com

[2] Eng. Florestal, UFSM, Avenida Roraima n.º 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria — RS, Brasil, flaianecatarine@hotmail.com

[3]CMPC Brasil, R. São Geraldo n.º 1680, CEP: 92703-470, Guaíba — RS, Brasil, norton.borges@cmpc.com, franco.quevedo@cmpc.com

[4] Programa de Pós-graduação em Agricultura de Precisão - Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria/UFSM, Avenida Roraima n.º 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria — RS, Brasil, amaralufsm@gmail.com

[5] See Tree Serviços Analíticos Brasil Ltda., Rua Padre Duarte nº151, Sala 65 CEP:14800-360, Araraquara – SP, Brasil, coordenacao@seetree.co

[6] Mensura Serviços Florestais Ltda, Avenida Marechal Castelo Branco, n.º 2945, CEP: 92700-790, Guaíba — RS, Brasil, terceiro.vagner.machado@cmpcrs.com.br

RESUMO

A produção de eucalipto constitui uma das principais bases do setor florestal brasileiro, sendo fundamental para o fornecimento de matéria-prima para celulose, madeira e energia. A produtividade dos plantios depende de diversos fatores, onde a sobrevivência das mudas sobressai como um dos critérios mais importantes para o estabelecimento de um plantio com boa uniformidade e produtividade. Dentre as estratégias de manejo silvicultural, a avaliação de sobrevivência nos primeiros meses após o plantio é essencial para garantir o máximo potencial produtivo da área. Neste sentido, foram realizados voos com VANT em cinco plantios de eucalipto com diferentes idades, entre 2 à 6 meses. As imagens foram processadas em sistema da SeeTree, obtendo-se mosaicos de alta resolução analisados por inteligência artificial. Todos os resultados das avaliações de sobrevivência foram validados em campo por amostragem. A variação amostral com o censo por imagem variou de -3,9 a 1,3%. O emprego do monitoramento da sobrevivência por VANT é uma alternativa ao inventário realizado por equipes com alta assertividade.

Palavras-chave: *Eucalyptus.* Inventário qualitativo e quantitativo. Drone.

ABSTRACT

Eucalyptus production is one of the mainstays of the Brazilian forestry sector, being fundamental for the supply of raw materials for pulp, wood, and energy. The productivity of plantations depends on several factors, with seedling survival standing out as one of the most important criteria for establishing a plantation with good uniformity and productivity. Among silvicultural management strategies, evaluating survival in the first months after planting is essential to guarantee the maximum productive potential of the area. In this

ISBN 978-65-990392-6-3

sense, UAV flights were carried out in five eucalyptus plantations of different ages, between 2 and 6 months. The images were processed in the SeeTree system, obtaining high-resolution mosaics analyzed by artificial intelligence. All results of the survival evaluations were validated in the field by sampling. The sampling variation with the image census ranged from -3.9 to 1.3%. The use of UAV survival monitoring is an alternative to inventory carried out by teams with high accuracy.

Keywords: *Eucalyptus.* Qualitative and quantitative inventory. Drone.

1 INTRODUÇÃO

A produção de eucalipto é uma das principais bases do setor florestal brasileiro, ocupando mais de 7,8 milhões de hectares, sendo responsável por suprir as indústrias de celulose, painéis de madeira e energia (IBÁ, 2024). *Eucalyptus* sp. é reconhecido por sua elevada taxa de sobrevivência e boa adaptação em diferentes ambientes, o que o torna uma das espécies de principal escolha nas práticas silviculturais brasileiras (SILVEIRA et al., 2020).

O emprego de VANTs no manejo florestal vem ganhando importância por várias razões, dentre elas podemos citar a redução de custos, flexibilidade de tempo e espaço, dados de alta precisão e a vantagem de não envolver riscos humanos (BANU et al., 2016). Dentre as atividades que estão sendo substituídas, temos os inventários de campo tradicionais, com foco predominante em florestas plantadas, particularmente utilizando sensores RGB acoplados a VANT para estimativa altura total das árvores, DAP (diâmetro à altura do peito), biomassa acima do solo e área da copa (SILVA et al., 2024). Além disso, as imagens aéreas processadas geram diversos índices de vegetação como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Reflectância de Senescência das Plantas (PSRI), utilizados com o apoio de IA para a detecção de doenças (PEDRALI et al., 2019) ou na determinação do vigor vegetativo em brotações de eucalipto (MEDAUAR et al., 2020).

Entre os fatores determinantes para o sucesso da produção, está a sobrevivência de mudas, um dos principais parâmetros analisados dentro dos padrões iniciais de avaliação de qualidade (MALLMANN et al*.,* 2025). Métodos tradicionais, baseados no levantamento amostral de parcelas, embora tenham uma boa precisão, são onerosos em tempo e mão de obra. Nesse contexto, tecnologias como veículos aéreos não tripulados (VANTs) e técnicas de sensoriamento remoto têm se mostrado ferramentas promissoras para estimar a sobrevivência de mudas de forma rápida e com alta assertividade, complementando ou substituindo monitoramentos convencionais (ALMEIDA et al., 2021; DAVIS e PINTO, 2024).

Integrar voos periódicos de VANT à rotina de estabelecimento em eucaliptocultura permite a avaliação eficiente da sobrevivência das mudas, proporcionando ganho de escala, maior rastreabilidade e confiabilidade na tomada de decisão silvicultural. Além disso, o uso de imagens de alta resolução espacial possibilita a detecção de falhas no plantio, reduzindo o tempo e os custos associados às formas de manejo convencionais (ALMEIDA et al., 2021; ZHAO, 2021).

O presente estudo teve como objetivo avaliar a sobrevivência de mudas de *Eucalyptus saligna* utilizando VANTs, comparando os resultados obtidos com o levantamento de campo, a fim de validar a eficácia dessa ferramenta no monitoramento de plantios florestais.

2 DESCRIÇÃO DE CASO TÉCNICO

A pesquisa foi realizada em 5 plantios comerciais de eucalipto entre 2,6 a 6,8 meses de idade das seguintes espécies: *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna* e híbrido de *E. urophylla* x *E.*

ISBN 978-65-990392-6-3

globulus. As informações de altitude, espaçamento, tipo de solo, data de plantio, idade e área de cada talhão estão na Tabela 1.

Os projetos estão localizados nos seguintes municípios: Barra do Ribeiro, Eldorado do Sul, Guaíba e Mariana Pimentel (Figura 1). O clima da região é classificado como subtropical úmido (Cfa) de acordo com o sistema de classificação de Köppen (Alvares et al., 2013), com temperatura média anual superior a 18°C e precipitação média anual em torno de 1650 mm (ANA, 2006).

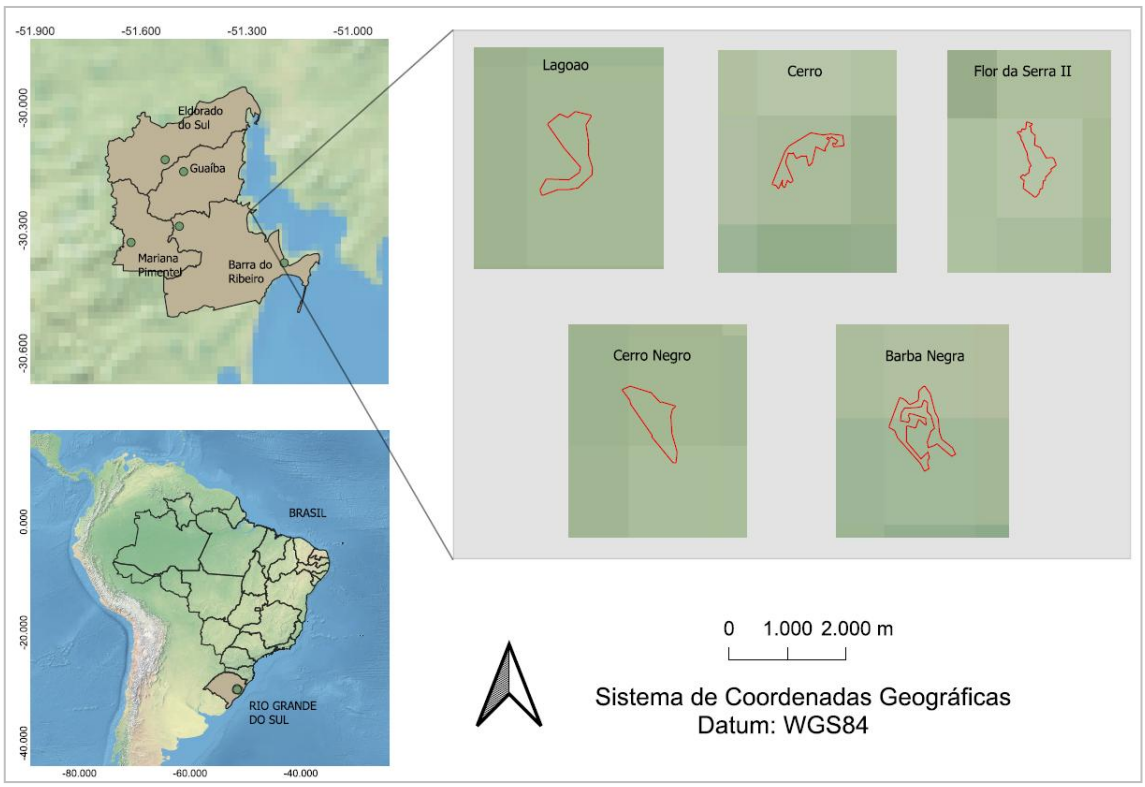
Tabela 1. Descrição das áreas utilizadas para a realização dos voos e amostragens.

Projeto	Material genético	Altitude (m)	Espaçamento (m)	Tipo de solo	Data de Plantio	Idade (meses)	Área (ha)
Lagoao	AEC 0144-Urophylla	115	4 x 1,85	PVA2	28/10/2024	2,6	12,53
Barba Negra	AEC 0144-Urophylla	35	4 x 1,85	PVA1	21/08/2024	4,9	23,29
Cerro Negro	32864-Saligna	107	4 x 1,85	PVD2	03/07/2024	6,5	25,54
Cerro	37254-Uroglobulus	162	4 x 1,85	PAD1	24/06/2024	6,8	20,46
Flor da Serra II	32864-Saligna	257	3 x 2	PVA2	23/09/2024	3,8	16,8

Fonte: Autores (2025).

Para cada área, foi realizado voo com sensor embarcado em VANT. Foi utilizado o modelo MATRICE 300 RTK fabricado pela DJI (Dà-Jiāng Innovations) com câmera RGB modelo P1 do mesmo fabricante. Os voos foram realizados com altura de 90 metros e velocidade de 10 m/s, GSD com até 1,3 cm/pixel, sobreposição de imagem: maior que 70% vertical e horizontal, condição de luz: sol com ângulo de 35 graus acima do horizonte.

Figura 1. Mapa de localização das cinco áreas sobrevoadas com VANT.



Fonte: Autores (2025).

ISBN 978-65-990392-6-3

As imagens foram processadas em sistema proprietário da SeeTree, obtendo-se mosaicos de alta resolução analisados por modelo de inteligência artificial: foi realizada a detecção de copa através de algoritmos de segmentação de instâncias, classificação de pixel via arquiteturas de Deep Learning (como U-Net e Mask R-CNN), usadas redes convolucionais profundas (CNNs) para a extração de métricas biofísicas de cada indivíduo. Posteriormente, foram disponibilizadas em plataforma digital e aplicativo mobile. Foram gerados os índices de sobrevivência, o número de mudas com baixo desenvolvimento e o número de mudas necessárias para a realização de replantio visando manter o estande máximo de plantas vivas dentro do talhão. Na Figura 2, temos a imagem aérea obtida no plantio com 2,6 meses de idade. Podemos observar a detecção das falhas através dos círculos de coloração roxa.

Figura 2. Detecção de falhas através de VANT em plantio de *E. urophylla* com 2,6 meses de idade. Projeto Lagoao. Coordenadas: -30,15623249; -51,47966676. Data do voo: 14/01/2025.

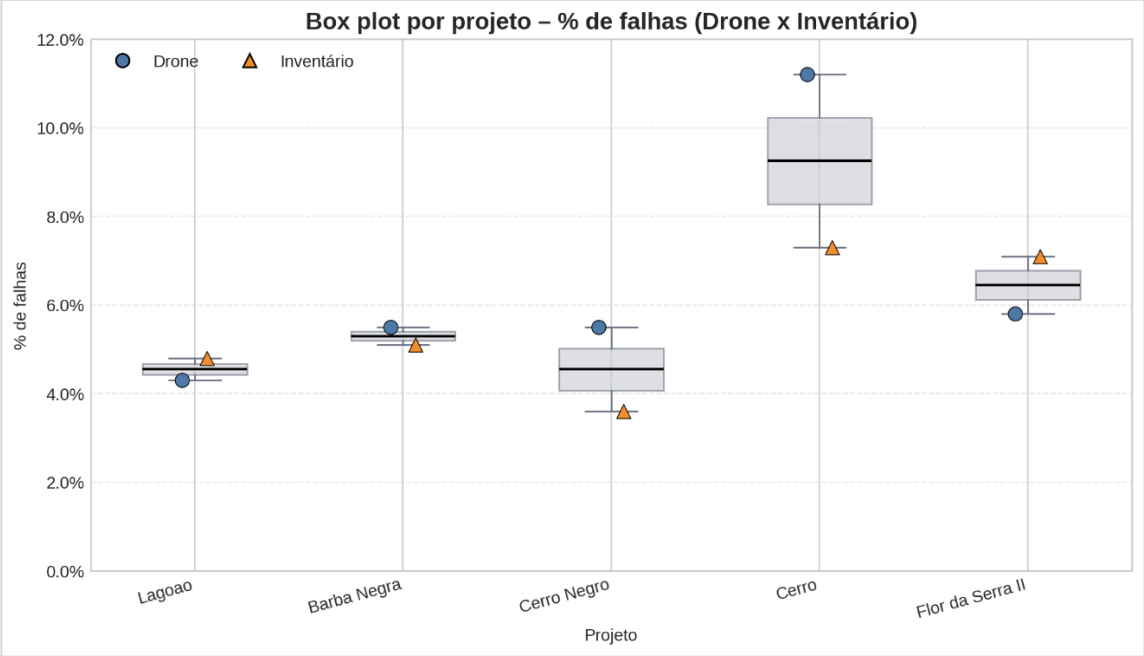


Fonte: Autores (2025).

Foram realizadas amostragens em todos os talhões, resultando em uma representatividade de aproximadamente 5% da área, contabilizando as mudas vivas e as falhas. O sistema amostral foi baseado na avaliação de 100 plantas a cada vinte linhas de plantio.

Observou-se que o índice de falhas comparando o levantamento com VANT (censo) e o levantamento amostral em campo, apresentou diferenças significativas com variação entre -3,9 a 1,3%, conforme a Tabela 2. No Projeto Cerro, houve a maior diferença que foi de -3,9%, ou seja, a amostragem de falhas resultou em um valor menor do que o real. Isto pode gerar um impacto relevante na produtividade final do plantio devido à redução significativa do estande de plantas, que foi da ordem de 3.398 plantas ou 11,2% de falhas no plantio de acordo com o levantamento com VANT (Figura 3).

Figura 3. Variação entre o percentual de falhas em cada método de levantamento.



Fonte: Autores (2025).

Conforme a Tabela 2, houve variação para maior ocorrência de falhas do que os valores reais no campo nos Projetos Lagoao e Flor da Serra II. Este erro pode gerar a necessidade de replantios desnecessários que levam ao aumento de custos e impactos econômicos. Por outro lado, houve variação para menor ocorrência de falhas em comparação aos dados no terreno nos Projetos Barba Negra, Cerro Negro e Cerro, podendo acarretar uma menor produtividade da área se não forem tomadas medidas como o replantio ou reforma para garantir o máximo potencial produtivo por hectare.

Tabela 2. Resultados das avaliações de sobrevivência e percentual de falhas através dos diferentes métodos.

Projeto	Idade (meses)	N° total de plantas	N° de mudas boas	N° de mudas pequenas	N° de Falhas	% Falhas (VANT)	% Falhas (Inventário)	Variação
Lagoao	2,6	15700	15029	0	671	4,3%	4,8%	0,5%
Barba Negra	4,9	29889	28241	0	1648	5,5%	5,1%	-0,5%
Cerro Negro	6,5	31087	29251	120	1716	5,5%	3,6%	-2,0%
Cerro	6,8	30337	26928	11	3398	11,2%	7,3%	-3,9%
Flor da Serra II	3,8	23689	22284	25	1380	5,8%	7,1%	1,3%

Fonte: Autores (2025).

Estes resultados fornecem subsídios importantes para o emprego de novas tecnologias no inventário quantitativo do estande inicial de mudas no campo. RICHTER et al. (2025) também demonstraram alta precisão para a detecção de árvores individuais de *E. saligna* seis meses após o plantio, sugerindo o índice MPRI que forneceu robustez, desempenho eficiente, custo-benefício e simplicidade utilizando apenas regiões do espectro visível.

Importante ressaltar que além da informação do número de plantas vivas, o sensoriamento remoto pode ser utilizado para o mapeamento e diferenciação de plantas daninhas de folhas largas e estreitas, levando para o manejo direcionado e sustentável de mato-competição com menor custo e menor impacto ambiental (FERNANDES et al., 2025). Ainda,

ISBN 978-65-990392-6-3

sensores hiperespectrais embarcados em VANT podem ser uma ferramenta eficaz para o diagnóstico nutricional no campo, conforme o estudo de SILVA et al. (2025) em mudas de *E. saligna*. Outra funcionalidade é a detecção precoce de distúrbio de malformação radicular (RMD), uma doença abiótica que pode levar a morte da planta. Silva et al. (2026) indicam o uso de imagens multiespectrais para o monitoramento preciso e de baixo custo do estresse relacionado à RMD, apoiando a tomada de decisões silviculturais.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do sensoriamento remoto em extensas áreas como os reflorestamentos de eucalipto é extremamente desejável do ponto de vista dos monitoramentos qualitativo e quantitativo. A avaliação de sobrevivência de mudas pode ser quantificada através de sistemas baseados em imagens obtidas por VANT com o uso de modelos e inteligência artificial. Ainda, os modelos podem gerar mapas de infestação de plantas daninhas, diferenciação de folha larga e estreia, indicando doses mais adequadas de químicos e contribuindo com a sustentabilidade. Perspectivas futuras indicam a possibilidade de avaliação do crescimento das plantas e do vigor vegetativo durante o ciclo do plantio, bem como identificação de problemas fitossanitários como pragas, doenças bióticas e abióticas. Sobretudo vislumbra-se ganhos em escala, tempo e redução de custos comparando-se aos métodos tradicionais.

AGRADECIMENTOS

A empresa CMPC pela disponibilização das áreas de estudo.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. *et al*. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift,** v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507

ALMEIDA, A. *et al*. Individual tree detection and qualitative inventory of a *Eucalyptus* sp. stand using UAV photogrammetry data. ***Remote Sensing***, v. 13, n. 18, art. 3655, 2021. DOI: 10.3390/rs13183655. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/13/18/3655

BANU, T. P. *et al*. The Use of Drones in Forestry. **Journal of Environmental Science and Engineering,** B. 5. p. 557-562. DOI:10.17265/2162-5263/2016.11.007. Disponível em: https://www.academia.edu/55944179/The_Use_of_Drones_in_Forestry

DAVIS, S. F.; PINTO, R. M. Die-hard seedlings — a global meta-analysis on factors affecting seedling survival after outplanting. ***Forest Ecology and Management***, v. 566, 122684, 2024. DOI: 10.1016/j.foreco.2024.122684. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122684

FERNANDES, P. *et al*. Use of hyperspectral sensor and random forest for broadleaf and narrowleaf weed differentiation. New Forests, v. 56:46, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s11056-025-10113-w

ISBN 978-65-990392-6-3

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2024**. Brasília, DF: Ibá, 2024. Disponível em: https://iba.org/relatorio2024.pdf

MALLMANN, A. A. *et al*. Uniformity measures for young *Eucalyptus* sp. plantations using attributes extracted from UAV flights. ***New Zealand Journal of Forestry Science***, v. 55, 2025. Disponível em: https://nzjforestryscience.nz/index.php/nzjfs/article/view/411.

MEDAUAR, C.C. *et al*. Using unmanned aerial vehicle for identifying the vegetative vigor and quantify the area occupied by eucalyptus sprouts after chemical weeding in the state of Bahia, Brazil. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 32(3): p. 165-171, 2020. DOI: 10.9755/ejfa.2020.v32.i3.2083. Disponível em: https://www.mdpi.com/2223-7747/14/11/1677

PEDRALI, L.D. *et al*. Sensoriamento remoto multiespectral para determinação de níveis de severidade de seca de ponteiros em *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 47, n. 122, p. 224-234, jun. 2019. DOI: doi.org/10.18671/scifor.v47n122.05. Disponível em: https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr122/cap05.pdf

RICHTER V. *et al*. UAV-based spectral images using remote sensing and YOLOv8 in *Eucalyptus saligna* Sm. Inventory. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 35, e88522, p. 1-25, 2025. https://doi.org/10.5902/1980509888522

SILVA, B.R.F.d. *et al*. Using Drones for Dendrometric Estimations in Forests: A Bibliometric Analysis. **Forests**, v. 15, 1993, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/f15111993

SILVA, S.D.P.d. *et al*. Remote sensing by spectroradiometry applied to nutritional diagnosis in *Eucalyptus saligna* Smith. **Revista Observatorio de la Economia Latinoamericana**, Curitiba, v. 23, n. 8, p. 01-25. 2025. DOI: 10.55905/oelv23n8-070. Disponível em: https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/11053

SILVA, S.D.P.d. *et al*. Remote detection of root malformation disorder in Eucalyptus saligna using UAV multispectral imagery and U-Net++. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 244, 111522, 2026. https://doi.org/10.1016/j.compag.2026.111522

SILVEIRA, R. L. V. de A.; HIGASHI, E. N.; MOREIRA, A. M. Crescimento e sobrevivência de mudas de eucalipto sob doses de boro cultivadas em condições de viveiro e de campo. ***Ciência e Agrotecnologia***, Lavras, v. 44, e017518, 2020. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cagro/a/vnPLNGy5nqPtWCSTmP4tHBx

ZHAO, H. Failure detection in *Eucalyptus* plantation based on UAV orthoimage. ***Forests***, v. 12, n. 9, art. 1250, 2021. DOI: 10.3390/f12091250. Disponível em: https://www.mdpi.com/1999-4907/12/9/1250

ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 84

INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS NA AGRICULTURA REGENERATIVA: IMPACTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS NO CERRADO MATO-GROSSENSE

Integration of Digital Technologies in Regenerative Agriculture: Economic and environmental impacts in the Mato Grosso Cerrado

Modalidade: Relato de Experiência

Natália de Souza Nunes[1]; Matheus Monteiro Valero[2]
[1] Solinftec, Av. Brasília, 2.121, 16018-000, Araçatuba – SP, Brasil, natalia.nunes@solinftec.com
[2] Agrícola Zanella, MT-388, Km 55, 78319-000, Campos de Júlio - MT, Brasil, agricultura.digital@agricolazanella.com.br

RESUMO

A crescente demanda por eficiência produtiva e sustentabilidade ambiental tem impulsionado a adoção de tecnologias digitais no agronegócio. Este trabalho relata a experiência de uma propriedade agrícola do Mato Grosso. Um conjunto de soluções tecnológicas foram implantadas, incluindo telemetria, módulo climático e conectividade, criando um banco de dados agronômicos e definição de parâmetros de trabalho para otimizar as operações agrícolas. Os resultados demonstraram quedas expressivas no consumo de diesel, com destaque para a redução de 73,6% no tempo de motor ocioso dos pulverizadores e a diminuição de consumo médio (l/ ha) nos tratores e pulverizadores. Essa redução representa 195.840 litros de diesel, correspondendo aproximadamente R$ 1,1 milhão. Além da economia financeira, a redução de combustível contribuiu para mitigar emissões de gases de efeito estufa, representando cerca de 525 toneladas de CO_2 evitadas, reforçando o papel da agricultura digital como suporte à sustentabilidade e as práticas regenerativas.

Palavras-chave: Agricultura Digital. Eficiência Operacional. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The growing demand for productive efficiency and environmental sustainability has driven the adoption of digital technologies in agribusiness. This study reports the experience of a group of farms in Mato Grosso, Brazil. A set of technological solutions was implemented, including telemetry, a climate module, and digital access, enabling the creation of a database and the definition of operational parameters to optimize agricultural operations. The results indicate significant reductions in diesel consumption, notably a 73.6% decrease in idle engine time for sprayers and a reduction in average consumption (L/ha) for tractors and sprayers. This reduction totaled 195,840 liters of diesel, equivalent to an estimated saving of about R$ 1.1 million. Beyond financial savings, lower fuel use also mitigated greenhouse gas emissions, avoiding about 525 tons of CO_2, thus reinforcing the role of digital agriculture in supporting sustainability and regenerative practices.

Keywords: Digital Agriculture, Operation Efficiency, Sustainability.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

Entre os grandes desafios contemporâneos da agricultura, está o de aumentar a produção de alimentos para atender crescente demanda e, ao mesmo tempo, reduzir os impactos ambientais de sua prática. A agricultura possui papel estratégico no cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU (Organizações da Nações Unidas), reforçando a necessidade de conciliar o aumento da produção de alimentos com a maior eficiência e sustentabilidade nos sistemas produtivos - destacando metas como a ODS de Fome Zero e Agricultura Sustentável (ODS 2), a Energia Limpa (ODS 7) e a Ação Contra a Mudança Climática (ODS 13) (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2015).

O setor agrícola configura-se como um dos principais consumidores de energia, compreendendo insumos que vão dos combustíveis fósseis e fertilizantes até a necessidade de eletricidade e mão de obra, componentes fundamentais para o processo produtivo (PAL et al., 2021). A mecanização agrícola corresponde por grande parte dos custos operacionais e das emissões de gases de efeito estufa, decorrentes da combustão de diesel. Assim, torna-se essencial enfrentar o desafio de elevar a eficiência energética (LOVARELLI; BACENETTI, 2019).

Neste contexto, produzir mais alimentos de forma sustentável se fundamenta em práticas como a agricultura de regenerativa e de conservação, que visam reduzir os impactos negativos ao meio ambiente. Além disso, a eficiência produtiva e energética emerge como elemento fundamental para garantir a viabilidade desses sistemas (LIU, 2023).

A progressão da agricultura regenerativa vem sendo fortalecida com o uso de tecnologias de agricultura de precisão e de ferramentas digitais, priorizando estratégias de manejo que promovam o uso racional e minimizem as perdas de água, energia e insumos agrícolas (ZSCHEISCHLER et al., 2022). A transformação digital no meio rural possibilitada uma gestão baseada em dados, sustentando decisões desde o planejamento inicial até a condução do ciclo produtivo, monitorando as variáveis do ambiente agrícola e diminuindo os riscos, tornando as ações mais seguras e eficazes (DIAS et al., 2023).

Segundo um estudo realizado por BOLFE et al. (2020), um dos grandes desafios para a expansão da agricultura digital para os produtores está relacionado ao valor de investimento para aquisição de serviços especializados em agricultura digital e de precisão (44%) e que somente 9% dos agricultores pesquisados no ano possuem tecnologias mais complexas, como por exemplo piloto automático e telemetria (DIAS et al., 2023). Dessa forma, este estudo tem como objetivo relatar a experiência de implementação de tecnologias em uma propriedade no Mato Grosso, destacando os resultados em termos de economia de combustível, eficiência operacional, que podem ultrapassar os valores investidos. E principalmente, a contribuição para práticas regenerativas de baixo carbono.

2 RELATO DE EXPERIÊNCIA

A Agrícola Zanella, está localizada nos municípios de Campos de Júlio, com uma latitude de 13º53'58" sul e a uma longitude de 59º08'51" oeste e com uma altitude de 650 metros e, Comodoro, com uma latitude de 13º 39' 47" sul e a uma longitude de 59º 47' 09" oeste e com uma altitude de 600 metros, ambas no estado do Mato Grosso. Região caracterizada por clima Tropical úmido-seco, marcada por chuvas de verão com precipitação frequentemente maior que 200 mm mensais e estiagem de inverno, com precipitações inferiores a 50 mm, podendo chegar a zero em alguns meses, e temperatura média entre 24 °C e 26 °C (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

ISBN 978-65-990392-6-3

A área de produção é composta por quatro fazendas, totalizando aproximadamente 20 mil hectares (ha). Na safra, são cultivados cerca de 20 mil ha de soja, enquanto na safrinha o cultivo se diversifica em 15 mil ha milho (amarelo, pipoca e branco), além de variedades de feijões. Os outros 5 mil ha restantes são destinados ao plantio de plantas de cobertura, prática alinhada aos princípios da agricultura regenerativa.

Com mais de 40 anos de atuação, tem como característica histórica a busca contínua por inovação e evolução nos processos agrícolas. Foi pioneira na adoção do sistema de plantio direto na região em que atua e, desde então, vem se destacando em produtividade e tem mantido um histórico de incorporação de tecnologias que visam o aumento da eficiência, da produtividade e sustentabilidade, com foco em agricultura regenerativa.

Antes da adoção das soluções digitais, o grupo enfrentava desafios comuns relacionados às grandes operações agrícolas, como a dificuldade de acompanhar os indicadores de desempenho dos maquinários, consumo de diesel e imprecisões dos dados climáticos. Além disso, o registro dessas informações era moroso e praticamente inexistente, impossibilitando a construção de um histórico consistente que auxiliasse no planejamento agronômico. Esse cenário resultava em maior gasto de combustível, manutenções e limitações na tomada de decisão operacional.

Ao longo do tempo, a empresa avançou de sistemas manuais, como os marcadores mecânicos, para tecnologias baseadas em Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), o que proporcionou maior precisão nas operações mecanizadas. Diversas soluções tecnológicas foram testadas no ambiente produtivo, mas os resultados obtidos nem sempre foram satisfatórios. Essa constatação levou, em 2022, à criação de um setor exclusivo voltado à Agricultura Digital (AD), com o objetivo de estruturar e organizar a adoção e o acompanhamento dessas tecnologias. Nesse contexto, foi implementado o Centro de Operações Agrícolas (COA), responsável pelo monitoramento em tempo real das atividades operacionais nas unidades de produção.

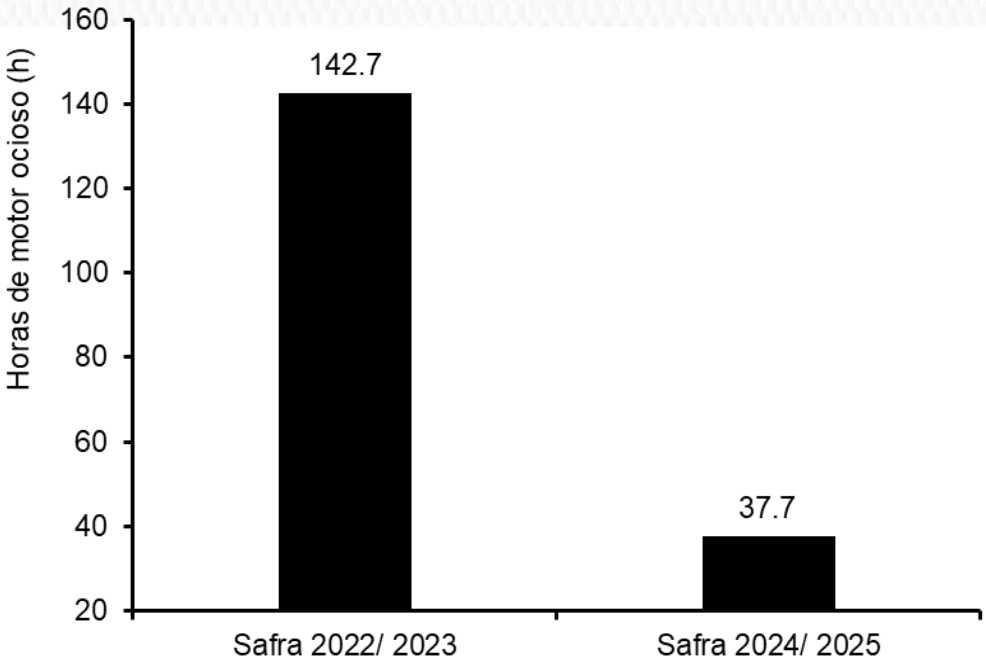
Em paralelo, foi implantado o sistema de telemetria Solinftec nos maquinários, obtendo 96% dos equipamentos monitorados, o que representou um avanço significativo na gestão de frota. Com os dados transmitidos em tempo real, tornou-se possível identificar padrões de operações, períodos de ociosidade e inconsistências no uso das máquinas. A telemetria passou a disponibilizar não somente as informações de consumo de diesel, como também parâmetros de eficiência operacional, como tempo de efetivo de trabalho, deslocamentos desnecessários e paradas não programadas.

Com esses dados, a fazenda realizou, por exemplo, uma análise e testes operacionais com os deslocamentos para abastecimento dos pulverizadores, identificando trajetos excessivos e reduzindo-os. O que trouxe ganhos logísticos imediatos, além de benefícios em manutenção a longo prazo, diminuindo os deslocamentos dos equipamentos com o tanque cheio.

Da mesma forma, o monitoramento das paradas trouxe um ganho relevante para a gestão, não identificando apenas que o equipamento está parado, como também, compreendendo o porquê, seja manutenção, abastecimento, falha operacional ou logística. Com essa diferenciação a equipe pôde agir de forma direcionada para reduzir tempos improdutivos. Nesse contexto, o controle de motor ocioso ganhou destaque, evitando o desperdício de combustível e contribuindo para a redução geral do consumo de diesel. Conforme a Figura 1, pôde-se observar que nos pulverizadores, com o auxílio da telemetria, obteve-se uma redução expressiva de aproximadamente 73,6% de motor ocioso, da primeira safra do projeto (2022/ 2023) para a última (2024/ 2025).

Figura 1 – Horas de motor ocioso dos pulverizadores nas safras 2022/2023 e 2024/2025 (setembro a agosto).

ISBN 978-65-990392-6-3



Fonte: Autor (2025).

Simultaneamente, a implementação do módulo climático ampliou a base de informações disponíveis para a tomada de decisão na fazenda, com o acompanhamento em tempo real de chuva, temperatura, umidade, radiação e vento. Informações diretamente integradas às máquinas agrícolas, possibilitando a parametrização das condições climáticas especificada para cada operação, orientando na decisão para início ou pausa das atividades, assegurando maior qualidade e eficiência na execução das práticas agrícolas. A geração de mapas e relatórios periódicos, podendo ter seu intervalo ajustado conforme a necessidade da equipe, tornou-se possível acompanhar e avaliar o impacto direto sobre as áreas produtivas, além de se tornar possível a construção de um histórico climático, fornecendo suporte ao planejamento estratégico e maior previsibilidade na gestão operacional.

Com o uso combinado das soluções climáticas e da telemetria, a equipe, gestores e operadores - que receberam treinamentos específicos, passaram a integrar dados à rotina de gestão.

A implantação da conectividade 4G foi eficaz para potencializar o uso das demais soluções digitais, como monitoramentos de pragas e envios de mapas de projetos de linha nos maquinários. No âmbito social, a rede 4G ampliou a inclusão digital de moradores e colaboradores, impactando não apenas a eficiência operacional, como também gerando um impacto positivo para a comunidade da fazenda, ao promover desenvolvimento e maior integração digital. A partir dessa estrutura tecnológica, tornou-se possível transformar dados em indicadores práticos de gestão.

Nos últimos anos, a Agrícola Zanella adotou a abordagem gradual para a padronização das operações agrícolas, com o objetivo de obter os melhores resultados a partir da análise contínua do desempenho das atividades. O processo de padronização foi direcionado à redução do consumo de combustível, aliado à melhoria do desempenho operacional. Um estudo realizado por MONTEIRO *et al.* (2011) demonstrou que aumentar a velocidade de trabalho de 6,5 para 7,5 kmh^{-1} e elevar a marcha de B2 para B3, proporciona ganhos de eficiência energética e diminui o consumo específico de combustível em 9,5%, exemplificando que nem sempre a menor velocidade resulta em menor consumo.

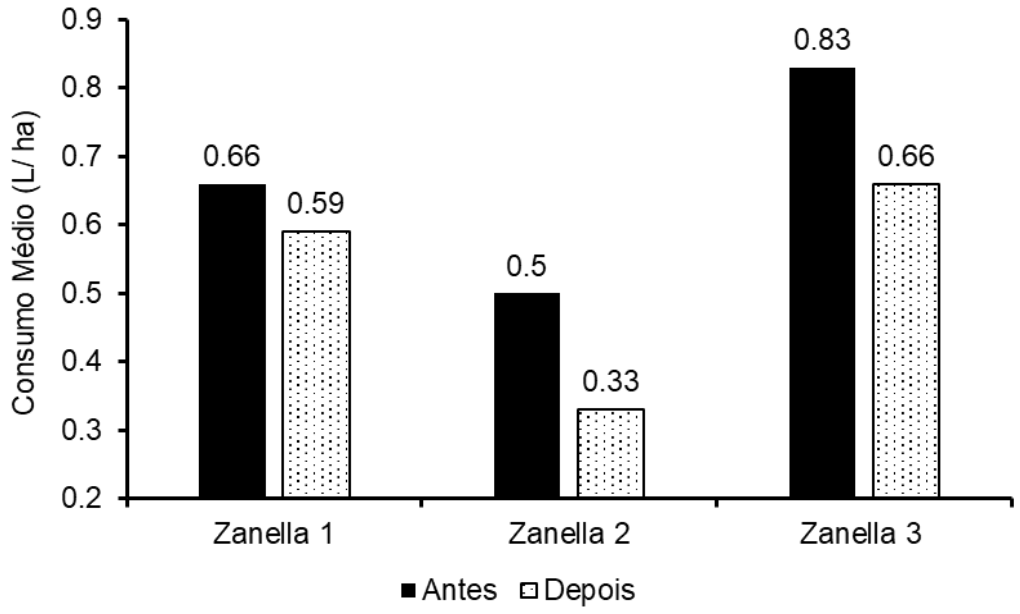
ISBN 978-65-990392-6-3

O desempenho energético de máquinas agrícolas está condicionado a um conjunto de variáveis interligadas, como a seleção adequada da marcha, rotação de motor, a carga plicada, as condições do solo e regulagem de implementos (FARIAS *et al.,* 2019; JASPER; SILVA, 2013; JANULEVIČIUS; JUOSTAS; PUPINIS, 2013; MONTANHA *et al.,* 2011). Dessa forma, eficiência não dependem apenas da velocidade de trabalho, mas da combinação equilibrada entre esses elementos, que permitem otimizar o uso do combustível, reduzir custos operacionais e mitigar impactos ambientais (SCHLOSSER *et al.,* 2020). Por estes motivos, a padronização foi realizada de forma segmentada, considerando as particularidades de cada operação - plantio, pulverização, colheita etc., e de cada área das unidades, como tipo de solo e declividade, permitindo ajustes mais precisos e adequados às demandas operacionais de cada etapa do processo produtivo.

Os resultados obtidos a partir dessa estratégia foram considerados satisfatórios, com destaque para a redução significativa no consumo de combustível, associada a um aumento do rendimento e a da efetividade operacional. Até o final do ano de 2022, os maquinários operaram sem a padronização formalizada. Essa estratégia visou identificar os padrões trabalhados na fazenda até o momento e construir de um histórico de dados para análise.

Na Figura 2**,** observa-se uma redução no consumo médio litros por hectare (L/ ha) nos pulverizadores após a padronização das operações em cada unidade (Zanella 1 e Zanella 4 apresentam no mesmo ambiente na plataforma), com destaque para a unidade Zanella 2, que obteve uma queda de 34%. Considerando que, após a padronização, a área total operacional atingiu aproximadamente 574 mil ha, estima-se que, caso os padrões anteriores tivessem sido mantidos, haveria um consumo adicional de 68.880 litros de diesel. Essa economia representa uma redução de 21% no consumo de combustível, apenas nas operações de pulverização. Em termos financeiros, o resultado representa cerca de R$ 385.728,00 (trezentos e oitenta e cinco mil, setecentos e vinte e oito reais) em economia para o grupo.

Figura 2 – Consumo Médio (L/ ha) dos pulverizadores antes e depois da padronização das operações.



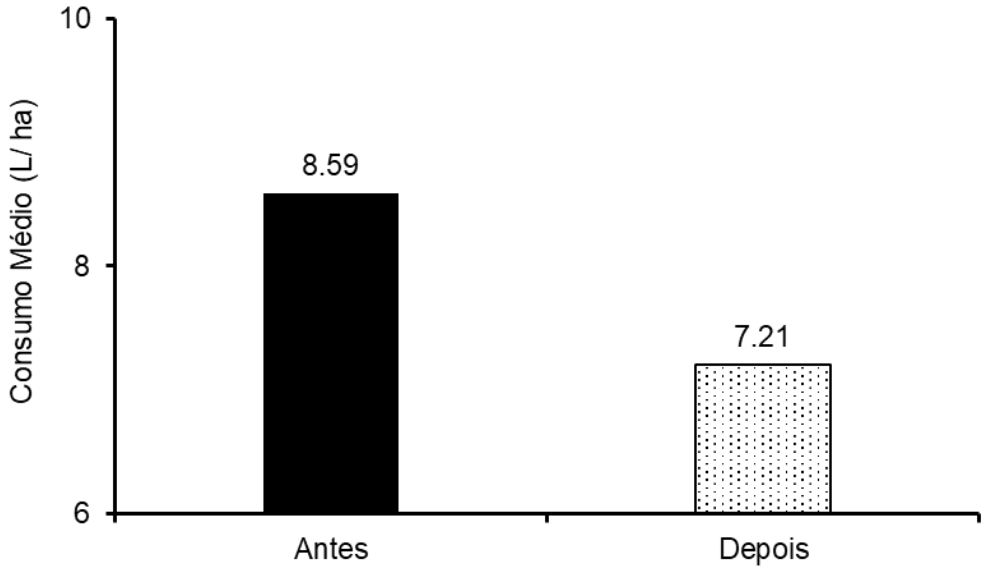
Fonte: Autor (2025).

A mesma tendência de redução foi identificada nos tratores, nos quais a padronização contribuiu para a diminuição de 1,39 L/ha no consumo médio de combustível (Figura 3). Considerando cerca de 92 mil hectares plantados após a padronização, essa redução

ISBN 978-65-990392-6-3

corresponde a aproximadamente 126.960 litros de combustível a menos consumidos, resultando em uma economia financeira estimada em R$ 710.976,00 (setecentos e dez mil, novecentos e setenta e seis reais). Esse resultado evidencia que o impacto positivo não restringiu apenas os pulverizadores.

Figura 3 – Consumo Médio (L/ ha) dos tratores antes e depois da padronização das operações.



Fonte: Autor (2025).

Em apenas duas frentes operacionais, pulverizadores e tratores, a padronização evitou o consumo de 195.840 litros de diesel, em apenas dois anos e sete meses analisados. A redução no consumo de combustível não representou apenas diminuição de custos, mas também contribuiu diretamente para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

As emissões geradas pelos motores de máquinas agrícolas não dependem apenas do tipo de combustível ou das características do motor, mas variam conforme a carga de trabalho e tecnologia disponível para controlar o processo de combustão (LINDEN; HERMAN, 2014). Em motores a diesel, esse efeito é ainda mais evidente: quanto maior o consumo sob determinadas condições operacionais, maior a emissão proporcional de CO_2 (JANULEVIČIUS *et al.*, 2016; SILVEIRA *et al.,* 2023; TSE *et al.,* 2015; WU *et al.,* 2015). O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006) estabeleceu um fator médio de emissão de CO_2 por litro de diesel consumido, permitindo estimar as emissões a partir da seguinte fórmula:

$$FE_{CO_2} = EF\ x\ \frac{NCV\ x\ \rho}{10^6}$$

Onde:

FE_{CO_2} = fator de emissão em kg CO_2/L de diesel
EF = fator de emissão em kg CO_2/TJ (74.100, segundo IPCC 2006)
NCV = poder calorífico líquido do diesel (43,0 MJ/kg)
ρ = densidade do diesel (0,835 kg/L)
10^6 = conversão de MJ para TJ

Dessa forma, temos:

ISBN 978-65-990392-6-3

$$FE_{CO_2} = 74.100\ x\ \frac{43{,}0\ x\ 0{,}835}{10^6}$$

$$FE_{CO_2} \approx 2{,}67\ kg\ CO_2/L$$

Sendo assim, a economia de combustível obtida nas operações possibilita estimar o volume de emissões evitadas. Considerando o fator de emissão médio de 2,68 kg CO_2/L de diesel (IPCC, 2006), a redução de 195.840 litros corresponde a aproximadamente 525 toneladas de CO_2 que deixaram de ser lançadas na atmosfera. Conforme cálculo a seguir:

$$CO_2\ evitado\ (kg) = Diesel\ economizado\ (L)\ x\ 2{,}68$$

$$CO_2\ evitado\ (kg) = \ 195.840\ (L)\ x\ 2{,}68$$

$$CO_2\ evitado\ (kg)\ \approx\ 524{,}9\ t\ CO_2$$

A redução no consumo de combustível não representou apenas diminuição de custos, bem como contribuir para diminuir as emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se às práticas de agricultura de baixo carbono. Ademais, o uso racional de recursos operacionais reduziu os desgastes de máquinas e otimizou o tempo de trabalho, evitando retrabalhos e minimizando impactos ambientais indiretos. Dessa forma, os avanços obtidos reforçam o compromisso da propriedade com a agricultura regenerativa, conectando eficiência produtiva e a conservação ambiental.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do COA, tornou-se possível realizar padronizações operacionais alinhadas às particularidades de cada área produtiva, com base na análise de dados provenientes de sensores e equipamentos. Atualmente, aproximadamente 80% das decisões operacionais e técnicas da empresa são fundamentadas em dados concretos coletados em campo. Esse processo de digitalização resultou em ganhos significativos: aumento do rendimento operacional, crescimento da produtividade e redução de custos em diversos setores.

Além do impacto econômico, os resultados também evidenciam avanços ambientais, como a redução expressiva do consumo de combustível e a consequente mitigação de emissões de gases de efeito estufa, em consonância com as práticas de baixo carbono e de agricultura regenerativa. Essa integração entre eficiência produtiva e sustentabilidade demonstra que a tecnologia, quando bem aplicada, não apenas moderniza a agricultura, mas também consolida novos padrões de gestão.

Por fim, a experiência relatada reforça o potencial de replicabilidade do modelo em outras propriedades agrícolas, mostrando que a transformação digital no campo pode ser um caminho estratégico para conciliar competitividade, responsabilidade socioambiental e segurança alimentar. Nesse sentido, a agricultura digital se apresenta como um pilar fundamental para a evolução da produção agrícola no Brasil e para o alcance das metas globais de sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

BOLFE, É.; JORGE, L.; SANCHES, I.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; DA COSTA, C.; VICTORIA, D.; INAMASU, R.; GREGO, C.; FERREIRA, V.; RAMIREZ, A. **Precision and Digital Agriculture:** Adoption of Technologies and Perception of Brazilian Farmers. Agriculture, 2020a, 10, 653. Disponível em: https://doi.rg/10.3390/agriculture10120653

DIAS, E.; DOURADO NETO, D.; SCOTON, M. L.; OLIVEIRA, D.; SANTOS, I.; MENEZES, J. H. **Agro 4.0**: fundamentos, realidades e perspectivas para o Brasil, Rio de Janeiro, RJ: Autografia, 2023. Pag. 65-120.

JASPER, S. P.; SILVA, P. R. A**.** Estudo comparativo do custo operacional horário da mecanização agrícola utilizando duas metodologias para o estado de São Paulo. **Revista Nucleus**, v. 10, n. 2, p. 119-126, 2013.

JANULEVIČIUS, A.; JUOSTAS, A.; PUPINIS, G. Tractor's engine performance and emissions characteristics in the process of ploughing. **Energy Conversion and Management**, v. 75, p. 498-508, 2013.

JANULEVIČIUS, A. et al. Estimation of carbon-oxide emissions of tractors during operation and correlation with the not-to exceed zone. **Biosystems Engineering**, v. 147, p. 117-129, 2016.

FARIAS, M. S. et al. Reduction of fuel consumption using driving strategy in agricultural tractor. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 2, p. 144-149, 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. 2006 **IPCC Guidelines for Nation Greenhouse Gas Inventories.** Volume 2: Energy. Hayama: IGES, 2006.

LIDE, V.V.; HERMAN, L. A fuel consumption model for off-road use mobile achinery in agriculture. **Energy**, v. 49, p. 880-889, 2014. Doi: hhttps://doi.org/10.1016/j.energy.2014.09.074.

LIU, S. Towards a sustainable agriculture: Achievements and challenges of Sustainable Development Goal Indicator 2.4.1. **Global Food Security**, v. 37, n. April, p. 100694, jun. 2023.

LOVARELLI, D.; BACENETTI, J. Exhaust gases emissions from agricultural tractors: State of the art and future perspectives for machinery operators***. Byosystems Engineering,*** London, v. 186, p. 204-213, Oct. 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.07.017

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia:** noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p. 124-127

MONTEIRO, L. A. et al. Desempenho de um trator agrícola equipado com pneus radiais e diagonais equipados com três níveis de lastros líquidos. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 551-560, 2011.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Brasília: ONU Brasil, 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 07 set. 2025.

PAL, A., NANDY, A., DEY, S., SLINGH, P.K.. Optimizing energy use efficiency for agricultural sustainability. 2021. In: Asif, M. (eds). **Energy and environmental security in developing countries**. Advanced sciences and technologies for security applications. Springer, Cham. 609-632.

SILVEIRA, F.; MACHADO, F. M.; FARIAS, M. S.; SCHLOSSER, J. F. Fuel consumption by agricultural machinery: a review of pollutant emission control technologies. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 53, n. 5, e20220029, 2023. DOI: https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20220029.

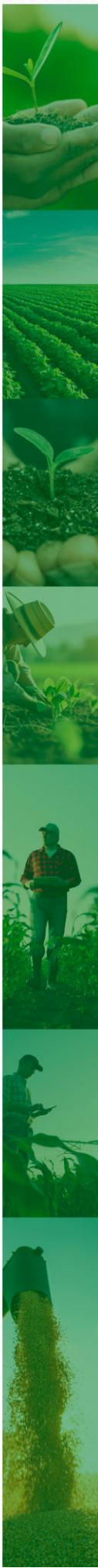
ISBN 978-65-990392-6-3

SCHLOSSER, J. F.; FARIAS, M. S.; BERTOLLO, G. M.; RUSSINI, A.; HERZOG, D.; CASALI, L. Agricultural tractor engines from the perspective of Agriculture 4.0. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 51, Special Agriculture 4.0, e20207716, 2020. DOI: https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200077.

TSE, H. et al. Investigation on the combustion characteristics and particulate emissions from a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-ethanol blends. **Energy**, v. 83, p. 343-350, 2015.

WU, X. et al. **Real-world emissions and fuel consumption of diesel buses and trucks in Macao:** From on-road measurement to policy implications. Atmospheric Environment, v. 120, p. 393-403, 2015.

ZSCHEISCHLER, J.; BRUNSCH, R.; ROGGA, S.; SCHOLZ, R. W. Perceived risks and vulnerabilities of employing digitalization and digital data in agriculture – Socially robust orientations from a transdisciplinary process. **Journal of Cleaner Production**, v. 358, n. April, p. 132034, jul. 2022.



ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 85

DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA APLICAÇÃO EM TAXA VARIADA DE NITROGÊNIO: UM ESTUDO DE CASO TÉCNICO PARA ADUBAÇÃO NITROGENADA EM TRIGO

Software Development for Variable-Rate Nitrogen Application: A Technical Case Study on Nitrogen Fertilization in Wheat

Modalidade: Descrição de Caso Técnico

Márcio Gabriel Mötke Wrubleski[1]; Thauhana Cássia Gasparotto Kuhn[1]; Teresa Enderle[1]; Thiago Santos Cocco[1]; André Luis Vian[1]; Christian Bredemeier[1]; João Leonardo Fernandes Pires[2]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – Rio Grande do Sul, Brasil, wrubleskimarcio@gmail.com; thauhanakuhn@gmail.com; terenderle@gmail.com; agro.thiagoscocco@gmail.com; andre.vian@ufrgs.br; bredemeier@ufrgs.br

[2] Embrapa Trigo, Passo Fundo - Rio Grande do Sul, Brasil, joao.pires@embrapa.br

RESUMO

O manejo da adubação nitrogenada em taxa variável é crucial para a triticultura, mas a conversão de mapas de NDVI em mapas de aplicação práticos representa um gargalo operacional. Este artigo apresenta um software funcional que automatiza um modelo de manejo de nitrogênio, fruto da colaboração UFRGS-Embrapa, a partir de um mapa em shapefile (.shp) de NDVI do estádio V6 do trigo como única entrada. O programa realiza a normalização do NDVI, classifica a área em zonas de manejo ("Baixa", "Média" e "Alta") e calcula as doses de ureia com base em parâmetros definidos pelo usuário, como a dose padrão e os percentuais de ajuste para cada zona. Essa abordagem permite a implementação de diferentes estratégias agronômicas, como a de homogeneização da lavoura, que consiste em aplicar doses maiores nas áreas de menor vigor. O software demonstra ser uma solução prática que democratiza o acesso à agricultura de precisão, padroniza a aplicação de uma metodologia científica validada e fortalece a conexão entre a pesquisa e a tomada de decisão no campo.

Palavras-chave: *Triticum aestivum L.*, adubação, software, manejo de nitrogênio.

ABSTRACT

Variable rate nitrogen fertilization management is crucial for wheat cultivation, but converting NDVI maps into practical application maps represents an operational bottleneck. This paper presents a functional software that automates a nitrogen management model, resulting from a UFRGS-Embrapa collaboration, using an NDVI shapefile (.shp) map from the wheat V6 stage as the sole input. The program performs NDVI normalization, classifies the area into 'Low,' 'Medium,' and 'High' management zones, and calculates urea doses based on user-defined parameters, such as the standard dose and adjustment percentages for each zone. This approach allows the implementation of different agronomic strategies, such as field homogenization, which consists of applying higher doses in less vigorous areas. The software proves to be a practical solution that democratizes access to precision agriculture, standardizes the application of a validated scientific methodology, and strengthens the connection between research and on-farm decision-making.

Keywords: *Triticum aestivum L.*, fertilizing, software, nitrogen managment.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

O nitrogênio (N) é o nutriente mineral mais exigido pelas plantas, essencial na constituição de clorofila, aminoácidos e ácidos nucleicos (TAIZ et al., 2017). No trigo, o crescimento e o alto potencial produtivo estão diretamente relacionados à adequada disponibilidade de N, especialmente nos períodos de maior demanda (BOSCHINI et al., 2011). Nos estados do RS e SC, a recomendação de adubação nitrogenada é baseada no teor de matéria orgânica do solo, cultura antecessora e expectativa de rendimento, sendo indicada aplicação fracionada entre a semeadura e fases de perfilhamento e alongamento (COMISSÃO..., 2016). Entretanto, fatores edafoclimáticos podem afetar a disponibilidade de N ao longo do ciclo, em função de sua alta mobilidade no solo e reações químicas no ambiente agrícola, o que compromete a eficiência da adubação (ZHU et al., 2015).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) tem sido amplamente utilizado na cultura do trigo por sua associação com a produção de biomassa, acúmulo de N e estimativas de produtividade (VIAN et al., 2018). Modelos de prescrição com sensores baseiam-se na diferença entre o NDVI da área e valores de referência (RAUN et al., 2005), porém, a obtenção desses valores exige conhecimento prévio da variabilidade espacial, o que limita sua aplicação prática (FRANZEN et al., 2016).

Com base nisso, nos últimos anos o Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD) vem sendo desenvolvido em parceria com a Embrapa Trigo. Os estudos foram conduzidos em diferentes localidades no Rio Grande do Sul (Coxilha e Eldorado do Sul) ao longo de cinco safras (2015-2019), demonstrou que a normalização dos dados de NDVI no estádio fenológico de seis folhas (V6) permite classificar a lavoura em zonas de manejo distintas ("baixa", "média" e "alta"), orientando uma redistribuição mais eficiente do fertilizante nitrogenado em cobertura (DRUM, 2018).

Apesar da validação científica e da crescente disponibilidade de mapas de NDVI para os agricultores, gerados por satélites, drones ou sensores embarcados, existe um "gargalo operacional" significativo: a dificuldade em traduzir essa informação em uma ação prática. A conversão de um mapa de NDVI em um mapa de prescrição de taxa variável funcional exige conhecimento em softwares de Sistema de Informação Geográfica (SIG), é um processo manual demorado e suscetível a erros, o que limita a adoção da tecnologia em larga escala.

Para superar essa barreira, este trabalho buscou desenvolver uma ferramenta computacional desenhada especificamente para operacionalizar o manejo nutricional em taxa variável. O objetivo deste trabalho é apresentar a arquitetura, o fluxo de trabalho e a aplicação prática do software, que visa automatizar a geração de mapas de aplicação de ureia em taxa variável a partir de um mapa de NDVI, tornando a ciência da adubação de precisão acessível, rápida e padronizada para agricultores e consultores.

2 DESCRIÇÃO DE CASO TÉCNICO

2.1 COLETA DE DADOS E FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA

A robustez de qualquer ferramenta computacional aplicada à agronomia reside na validade do modelo científico que a sustenta. O software proposto foi desenvolvido com base nos resultados dos estudos realizados entre as safras 2015 e 2019, cujo objetivo foi criar um método prático para guiar a aplicação de nitrogênio em taxa variável na cultura do trigo.

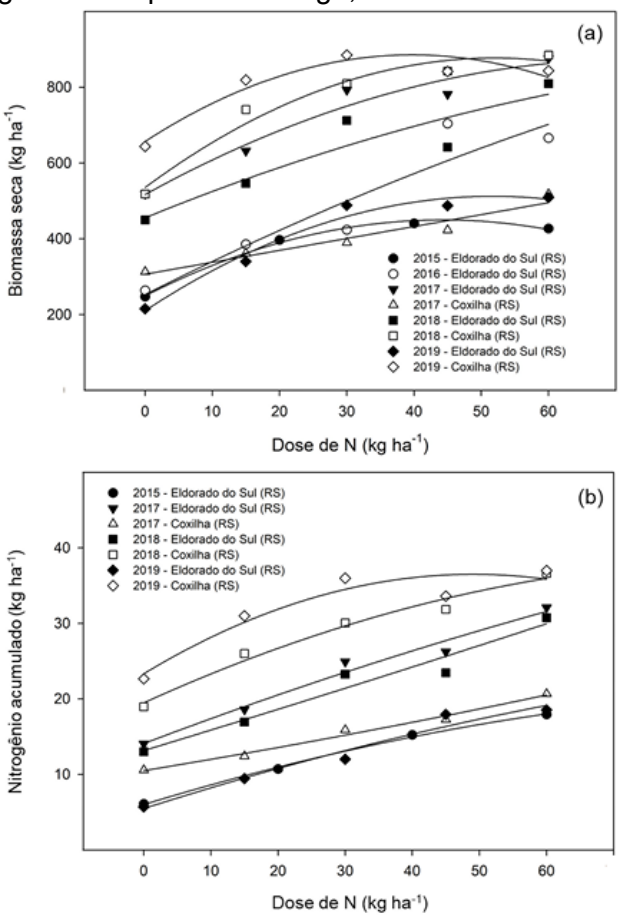
O presente estudo partiu da premissa de que o crescimento e o potencial produtivo do trigo estão intimamente ligados à disponibilidade de nitrogênio. Através de experimentos

ISBN 978-65-990392-6-3

conduzidos a campo em Coxilha e Eldorado do Sul (RS), entre 2015 e 2019, os pesquisadores avaliaram diferentes cultivares de trigo submetidas a doses variadas de N aplicadas na emergência, com o intuito de criar uma ampla gama de variabilidade no crescimento inicial das plantas. No estádio de seis folhas completamente expandidas, momento preconizado para a realização da adubação nitrogenada em cobertura, foram realizadas avaliações do acúmulo de biomassa seca, da quantidade de N acumulado na parte aérea e da reflectância do dossel através do sensor óptico ativo Greenseeker® para obtenção do NDVI.

A análise dos dados demonstrou uma correlação positiva e significativa entre o NDVI e as variáveis agronômicas de interesse, como a biomassa seca e o N acumulado na parte aérea. No entanto, os pesquisadores observaram que os valores absolutos tanto do NDVI quanto da biomassa e do N acumulado, apresentaram respostas distintas entre os diferentes locais e anos avaliados (Figura 1). Essa variação invalida o uso de valores de NDVI absolutos ou de um valor de "suficiência" único para criar um modelo geral de recomendação.

Figura 1 - Relação entre biomassa seca (a) e nitrogênio acumulado na parte aérea (b), no estádio de seis folhas completamente expandidas, em função de doses de nitrogênio aplicadas na emergência das plantas de trigo, em diferentes locais e anos.



Fonte: DRUM, M. A (2018).

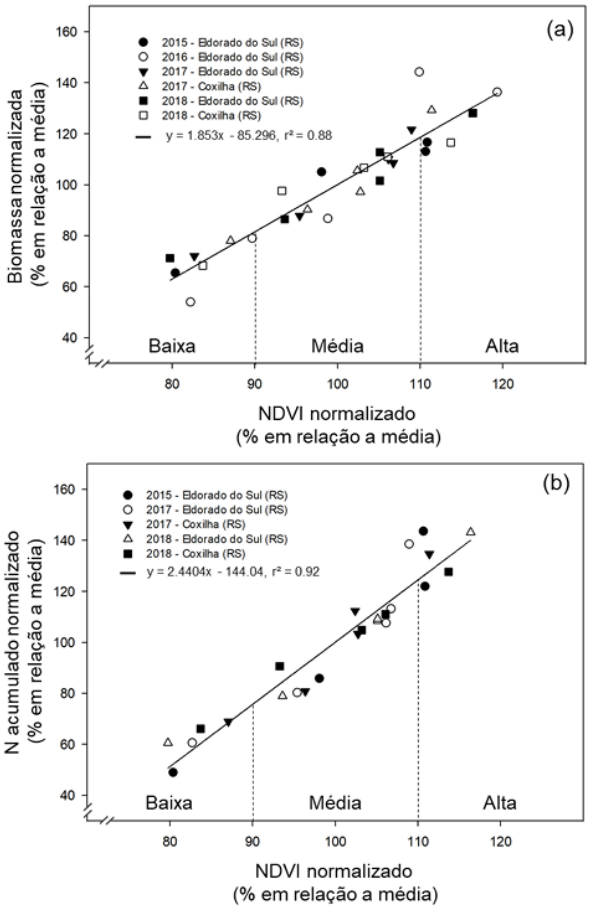
Com base na relação entre o NDVI normalizado e a biomassa/N acumulado normalizados, o estudo propôs a definição de três "zonas de manejo" ou "unidades de gestão diferenciadas", delimitadas por limiares críticos (Figura 2). Esses limiares, que constituem a lógica central implementada no software, são:

- Zona de Manejo "Baixa": Corresponde a áreas do talhão com valor de NDVI normalizado inferior a 90% da média. Estas áreas apresentam menor desenvolvimento vegetativo e, presumivelmente, maior potencial de resposta à adubação nitrogenada.

ISBN 978-65-990392-6-3

- Zona de Manejo "Média": Corresponde a áreas com valor de NDVI normalizado entre 90% e 110% da média. Representam a condição média de desenvolvimento da lavoura.
- Zona de Manejo "Alta": Corresponde a áreas com valor de NDVI normalizado superior a 110% da média. São as áreas com maior biomassa e N já acumulados, indicando um menor potencial de resposta a doses adicionais de N em cobertura.

Figura 2 - Zonas de manejo com base na relação entre biomassa e nitrogênio acumulado normalizados com o NDVI normalizado.



Fonte: DRUM, M. A (2018)

A solução metodológica que confere robustez ao modelo foi a normalização dos dados. Ao expressar os valores de NDVI de cada ponto amostral como um percentual em relação à média do talhão para cada experimento específico, foi possível eliminar os efeitos de ano, local e cultivar, gerando um índice relativo de variabilidade. Essa abordagem permitiu o desenvolvimento de um modelo geral capaz de classificar eficientemente a variabilidade no crescimento e acúmulo de N no trigo sob diferentes condições edafoclimáticas.

2.2 ARQUITETURA E FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE

Desenvolvida em ambiente Python com interface gráfica, projetada para ser uma solução prática e direta para o manejo da adubação nitrogenada. O software transforma um mapa de NDVI em um mapa de prescrição em poucos cliques, eliminando a necessidade de processos complexos em softwares de SIG.

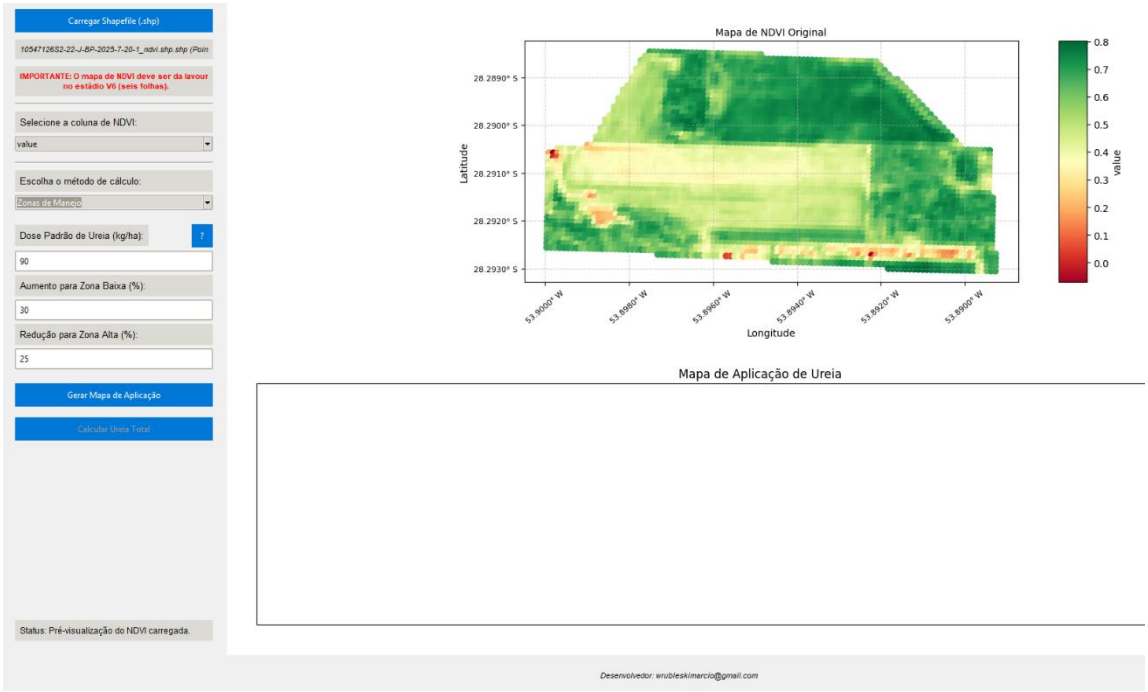
ISBN 978-65-990392-6-3

2.3 INTERFACE E REQUISITOS DE ENTRADA

A interface do programa é dividida em duas seções principais: um painel de controle à esquerda e uma área de visualização de mapas à direita (Figura 3). Para iniciar o processo, o usuário deve fornecer:

1. Arquivo Shapefile (.shp): Através do botão "Carregar Shapefile (.shp)", o usuário seleciona o mapa de NDVI da lavoura, que deve estar no estádio V6.
2. Coluna de Dados NDVI: Após carregar o arquivo, o usuário seleciona na lista suspensa qual coluna da tabela de atributos contém os valores de NDVI.
3. Parâmetros de Aplicação: O usuário define a estratégia de adubação preenchendo os seguintes campos no painel de controle:
    - Dose Padrão de Ureia (kg/ha): A dose que seria utilizada como referência ou na Zona Média que é abordada como dose padrão para cada zona tritícola do estado.
    - Aumento para Zona Baixa (%): O percentual de aumento da dose de ureia a ser aplicado nas áreas de baixo desenvolvimento (baixo NDVI).
    - Redução para Zona Alta (%): O percentual de redução da dose de ureia a ser aplicado nas áreas de alto desenvolvimento (alto NDVI).

Figura 3 - Imagem ilustrando o mapa NDVI carregado pelo usuário.



Fonte: Autores (2025)

2.4 FLUXO DE TRABALHO E GERAÇÃO DOS MAPAS

1. Carregamento e Visualização: Ao selecionar o arquivo .shp, o programa exibe imediatamente o "Mapa do NDVI Original" na área de visualização superior.
2. Cálculo e Prescrição: Após o preenchimento dos parâmetros de aplicação, o usuário clica no botão "Gerar Mapa de Aplicação". Neste momento, o software executa internamente todo o modelo científico:
    - Calcula o NDVI médio do talhão.
    - Normaliza os valores de NDVI de cada polígono.

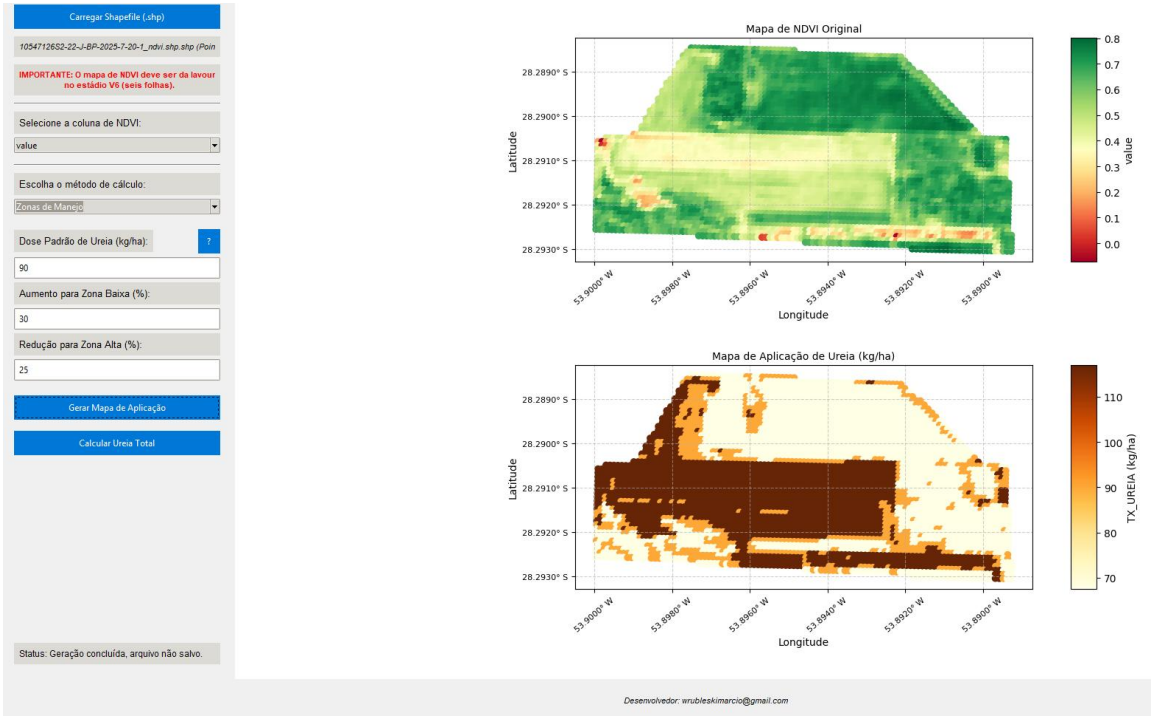
ISBN 978-65-990392-6-3

- Classifica cada polígono em "Zona Baixa", "Zona Média" ou "Zona Alta" com base nos limiares de 90% e 110% da média.
- Calcula a dose de ureia final para cada zona com base nos percentuais de aumento e redução definidos pelo usuário.

3. Visualização e Saída: O resultado final, o "Mapa de Aplicação de Ureia", é exibido na área de visualização inferior. Simultaneamente, um novo arquivo shapefile (.shp), contendo os polígonos com a recomendação de dose, é salvo automaticamente, pronto para ser utilizado em máquinas agrícolas. A barra de status informa "Geração concluída, arquivo .shp salvo".

A ferramenta ainda inclui um botão "Calcular Ureia Total", que fornece a quantidade total de fertilizante (em kg) necessária para a área, auxiliando no planejamento logístico.

Figura 4 - Imagem ilustrando o mapa de NDVI carregado pelo usuário juntamente com o mapa adubação gerado pelo software.



Fonte: Autores (2025).

A apresentação do software levanta uma discussão importante sobre a trajetória da agricultura de precisão e a transferência de tecnologia do meio acadêmico para o setor produtivo. A proposta da ferramenta vai além de uma simples automação de tarefas, ela aborda diretamente os principais gargalos que limitam a adoção em larga escala de práticas de manejo localizado.

2.5 CONTEXTO TECNOLÓGICO E COMPARATIVO COM FERRAMENTAS SIMILARES

O software proposto não surge em um vácuo tecnológico. O ecossistema de ferramentas para agricultura de precisão é vasto, variando desde plataformas de gestão agronômica integradas e de alto custo, como Climate FieldView™ e John Deere Operations Center™, até soluções mais acessíveis, como plugins desenvolvidos para softwares de SIG (Sistema de Informação Geográfica) de código aberto, notadamente o QGIS. É em comparação com este último grupo que os diferenciais do software se tornam mais evidentes.

Softwares como o QGIS são extremamente poderosos e versáteis, e diversos plugins permitem a realização de análises de dados de NDVI e a criação de mapas de aplicação. No

entanto, essa flexibilidade vem acompanhada de uma maior complexidade. Para contextualizar a contribuição da ferramenta apresentada é útil uma comparação direta com a abordagem via plugins de SIG:

- Base Científica e Validação Regional: O principal diferencial da ferramenta é ter como núcleo um modelo agronômico validado especificamente para a triticultura nas condições do Sul do Brasil, fruto da colaboração UFRGS-Embrapa. Muitos plugins genéricos de SIG aplicam classificações matemáticas que não possuem, necessariamente, uma correspondência agronômica direta ou validação regional, deixando a cargo do usuário a interpretação e o risco da recomendação.

- Curva de Aprendizado e Foco no Usuário: Sua interface foi desenhada para um agrônomo ou produtor, com termos e um fluxo de trabalho focados na tarefa de adubação. Em contrapartida, para utilizar um plugin no QGIS, o usuário precisa primeiro instalar e aprender a operar o ambiente SIG, o que inclui entender sobre sistemas de coordenadas, camadas vetoriais e manipulação de tabelas de atributos. Essa barreira técnica, mesmo que básica, ainda é um impeditivo significativo para muitos profissionais do campo.

- Agilidade e Padronização do Processo: Sendo uma ferramenta mais especialista, executa o processo completo em poucos cliques, de forma padronizada e repetível. O mesmo processo em um software SIG, embora possível, seria manual, mais demorado e sujeito a variações de execução entre diferentes usuários, podendo levar a inconsistências na geração dos mapas de prescrição.

A Tabela 1 apresenta o resumo dessas comparações, destacando o nicho de mercado, as oportunidades e a proposta de valor da ferramenta.

Tabela 1 - Comparativo funcional entre a ferramenta e plugins genéricos de SIG.

	Software apresentado	**Plugins Genéricos (Ex: QGIS)**
Base Científica	Modelo regional validado (UFRGS/Embrapa)	Classificação matemática geral
Curva de Aprendizado	Baixa (intuitivo)	Moderada (requer conhecimento em SIG)
Software Adicional	Nenhuma (autônomo)	Requer instalação e uso do QGIS
Foco da Aplicação	Específico para N em trigo no V6	Genérico para qualquer cultura/índice
Fluxo de Trabalho	Automatizado e padronizado	Manual e dependente do usuário

Fonte: Autores (2025).

2.6 DEMOCRATIZAÇÃO DO ACESSO À TAXA VARIÁVEL (TV)

O principal impacto do projeto é a democratização da tecnologia de adubação em taxa variável. Atualmente, a geração de mapas de prescrição exige, em geral, o uso de softwares de SIG complexos e caros, além de um conhecimento técnico em geoprocessamento que a maioria dos agricultores e muitos consultores não possui. Ao encapsular a metodologia científica em uma interface simples e intuitiva, a ferramenta remove essa barreira técnica e financeira, permitindo que um usuário com conhecimento agronômico básico possa executar o processo do início ao

ISBN 978-65-990392-6-3

fim. Isso torna a prática acessível não apenas para grandes grupos empresariais, mas também para cooperativas e produtores de médio porte que já têm acesso a dados de NDVI.

Existe frequentemente um hiato entre a publicação de um resultado de pesquisa e sua efetiva implementação no campo. O programa descrito serve como uma ponte direta para transpor esse vale. O software pega um modelo validado em condições locais, publicado em um artigo científico, e o transforma em um produto de fácil utilização. Essa operacionalização da ciência é crucial, pois garante que as decisões de manejo no campo sejam baseadas em dados e métodos que foram rigorosamente testados e validados, aumentando a segurança e a eficácia das práticas de agricultura de precisão.

A execução manual do processo de normalização e classificação de um mapa de NDVI está sujeita a variações e erros, dependendo da habilidade e do método empregado pelo técnico. Cada vez que um usuário processa um mapa, o software aplica exatamente a mesma lógica, os mesmos cálculos e os mesmos limiares. Essa consistência é fundamental para que se possam comparar resultados entre diferentes talhões e safras, e para assegurar que a recomendação agronômica siga fielmente os preceitos da pesquisa que a originou.

A redistribuição inteligente do fertilizante nitrogenado, conforme proposto pelo modelo, tem o potencial de gerar benefícios econômicos e ambientais significativos. Ao alocar mais N nas zonas de maior potencial, busca-se um aumento de produtividade que mais do que compensa eventuais perdas nas zonas de menor potencial, otimizando o retorno sobre o investimento em fertilizantes. Do ponto de vista ambiental, a prática contribui para a sustentabilidade da atividade agrícola. A redução da aplicação de N em áreas onde a resposta à adubação já é reduzida e o aumento em zonas de alta resposta ao nutriente minimizam os riscos de perdas para o ambiente, seja por lixiviação para os lençóis freáticos, seja por volatilização ou desnitrificação para a atmosfera.

O programa não apenas agiliza a operação, mas também garante que a conversão do dado de vigor vegetativo em um mapa de aplicação de fertilizante seja feita de forma padronizada, repetível e fiel à pesquisa que a suporta.

Conclui-se que a ferramenta atinge seus objetivos principais, que são: o software traduz fielmente um fluxo de trabalho automatizado, utilizando o NDVI aferido no estádio de seis folhas para classificar a lavoura em zonas de manejo distintas. A arquitetura de fácil utilização e a exigência de um único arquivo de entrada (.shp) removem a necessidade de conhecimento avançado em softwares de geoprocessamento. A ferramenta não impõe uma única lógica de recomendação, pois ao permitir que o usuário defina os percentuais de ajuste para as zonas de manejo, o software se torna uma plataforma para a aplicação de diferentes estratégias agronômicas.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A dificuldade em converter dados de sensoriamento remoto em ações de manejo práticas e imediatas representa um dos maiores desafios para a ampla adoção da agricultura de precisão. O software apresentado neste artigo foi concebido para endereçar diretamente este problema no contexto da adubação nitrogenada de cobertura na cultura do trigo.

O trabalho demonstrou que a ferramenta cumpre seu objetivo ao automatizar com sucesso um modelo científico validado para as condições do Sul do Brasil, oferecendo uma interface intuitiva que minimiza a barreira do conhecimento técnico em geoprocessamento. Conclui-se que a principal contribuição do software é a sua capacidade de não apenas padronizar o processo, mas também de conferir flexibilidade ao manejo agronômico, permitindo que o

ISBN 978-65-990392-6-3

usuário aplique diferentes estratégias de redistribuição do fertilizante de acordo com seus objetivos, seja de homogeneização da lavoura ou de maximização do potencial produtivo.

Dessa forma, o desenvolvimento de ferramentas computacionais focadas e de fácil utilização é um passo essencial para acelerar a transferência de tecnologia e materializar os benefícios da pesquisa agronômica. Ao empoderar agricultores e consultores com soluções que traduzem a ciência em decisões práticas, avançamos para um modelo de agricultura mais inteligente, eficiente e sustentável.

REFERÊNCIAS

BOSCHINI, A. P. M. et al. Aspectos quantitativos e qualitativos do grão de trigo influenciados por nitrogênio e lâminas de água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 5, p. 450-457, 2011.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, 2016. 376 p.

DRUM, M. A. **Algoritmos para adubação nitrogenada em cobertura a taxa variável para as culturas de milho e trigo.** 2018. 76 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

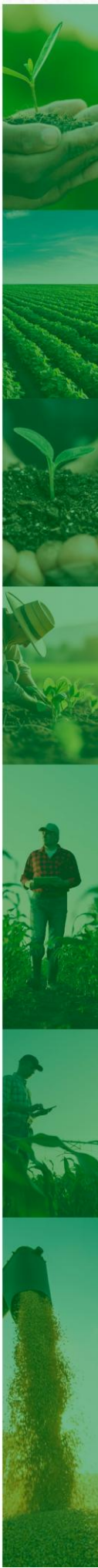
FRANZEN, D. et al. Algorithms for in-season nutrient management in cereals. **Agronomy Journal**, Madison, v. 108, n. 5, p. 1775-1781, 2016.

RAUN, W. R. et al. **Optical sensor based algorithm for crop nitrogen fertilization.** Communications in Soil Science and Plant Analysis, London, v. 36, p. 2759-2781, 2005.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

VIAN, A. L. et al. Nitrogen management in wheat based on the normalized difference vegetation index (NDVI). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 48, n. 9, e20170743, 2018.

ZHU, Q.; SCHMIDT, J. P.; BRYANT, R. B. Maize (Zea mays L.) yield response to nitrogen as influenced by spatio-temporal variations of soil-water-topography dynamics. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 146, p. 174-183, 2015.



ISBN 978-65-990392-6-3

CAPÍTULO 86

USO DE FERRAMENTAS DE MONITORAMENTO REMOTO NA ZOOTECNIA DE PRECISÃO

Use of remote monitoring tools in precision animal science

Ana Lívia dos S. Ribeiro[1]; Ana Carolina M. Rodrigues[1]; Luiz Felipe S. Pavão[1]; André Müllich[1]; Jaqueline Sgarbossa[1]; Luciano Z. Pes[1]; Vanessa B. Rosa[1]; Diego Zeni[1]

[1] Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima, 97105-000, Santa Maria – Rio Grande do Sul, Brasil, analiviadossantosribeiro@gmail.com , rodrigues.ana@acad.ufsm.br, felipepavao14@gmail.com, andre.mullich@hotmail.com, sgarbossa.jaqueline@ufsm.br, lucianopes@politecnico.ufsm.br, bayerdarosa@hotmail.com, diego.zeni@ufsm.br

Modalidade: Relato de experiência

RESUMO

Ao longo dos anos, vemos a globalização e a tecnologia sendo cada vez mais essencial para a sociedade. Com isso, o termo zootecnia de precisão tem sido discutido e utilizado para destacar práticas e manejos de monitoramento animal, otimizando a eficiência e o controle da produção nas propriedades rurais, visando suporte ao produtor para estabelecer padrões de manejo, qualidade, sustentabilidade e capacidade produtiva. Quando se adota um sistema tecnológico no sistema de produção animal, as vantagens são diversas, destacando-se o monitoramento individual de cada animal e de todo o lote, nutrição, saúde, reprodução, comportamento e ambiência. Ao analisar esses dados, é possível que o pecuarista consiga tomar decisões mais rápidas e assertivas em relação ao seu sistema produtivo. Sabendo dessas informações, o Laboratório de Bovinocultura de Corte do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria firmou uma aliança estratégica com uma empresa com foco em pecuária de corte que desenvolve ferramentas tecnológicas para monitoramento e comportamento animal. Essa parceria tem contribuído para análise experimental para o sistema produtivo e comportamental dos bovinos de corte.

Palavras-chave: Zootecnia de precisão. Monitoramento animal. Tecnologia

ABSTRACT

Over the years, globalization and technology have become increasingly essential to society. In this context, the term *precision livestock farming* has been discussed and applied to highlight practices and management strategies for animal monitoring, optimizing efficiency and production control in rural properties, with the goal of supporting producers in establishing management standards, quality, sustainability, and productive capacity. When technological systems are adopted in animal production, the advantages are diverse, with particular emphasis on the individual monitoring of each animal and the entire herd, covering nutrition, health, reproduction, behavior, and environment. By analyzing these data, livestock farmers can make faster and more assertive decisions regarding their production systems. Based on this perspective, the Beef Cattle Laboratory of the Polytechnic College at the Federal University of Santa Maria established a strategic alliance with a company focused on beef cattle farming that develops technological tools for animal monitoring and behavior analysis. This partnership has contributed to experimental analysis of the productive and behavioral system of beef cattle.

Keywords: Precision livestock farming. Animal monitoring. Technology

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

A Zootecnia tem como finalidade central otimizar a produtividade, a qualidade e a excelência dos sistemas de produção animal, integrando práticas que assegurem o bem-estar animal, a redução de custos e a eficiência na gestão agropecuária. A complexidade da cadeia produtiva e as exigências do mercado contemporâneo demandam profissionais altamente qualificados, comprometidos com a constante atualização e o aprimoramento técnico e científico (SEVEGNANI et al., 2023, p. 261). Nesse contexto, a incorporação de inovações tecnológicas nos processos produtivos configura-se não apenas como uma exigência do setor, mas como um diferencial competitivo essencial à sustentabilidade e ao sucesso das atividades desenvolvidas no meio rural.

A zootecnia de precisão é de suma importância para os dias atuais, visando uma gestão com segurança, informação, produtividade e rentabilidade. Essa inovação tecnológica tem como base a Engenharia de Processos, que utiliza a parte teórica da gestão da produção animal alinhada com os processos tecnológicos, assim surgindo sensores inteligentes que possibilitam que o produtor possa fazer outras atividades, otimizando o tempo dele.

Países como Holanda e Alemanha foram pioneiros em navegar nas "águas tecnológicas" da zootecnia de precisão. O gado leiteiro foi o foco inicial das pesquisas por volta dos anos 2000, consolidando-se a partir de 2010 com o uso de tecnologias como sistemas automatizados de ordenha, pesagem, monitoramento ruminal, temperatura corporal e atividade animal.

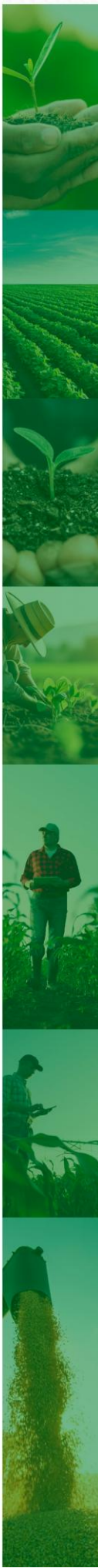
Com o avanço de tecnologias como a Internet das Coisas (IoT) e o Big Data, foi possível "ir a mar aberto" e explorar ainda mais soluções inovadoras. Um exemplo claro é o uso da Inteligência Artificial integrada a brincos-sensores, que monitoram em tempo real o comportamento e os sinais vitais dos animais. Esses sensores funcionam como gatilhos de alerta para o produtor ou veterinário, indicando que um determinado animal do lote pode estar doente muitas vezes antes mesmo de apresentar sintomas visíveis.

Além disso, a IoT permite o monitoramento preciso de variáveis ambientais, como temperatura, umidade e velocidade do ar, o que possibilita ajustes em tempo real na dieta, manejo e bem-estar dos animais. Por exemplo, em dias mais quentes, os animais tendem a se movimentar mais, aumentando sua exigência energética e hídrica. Isso exige atenção por parte do produtor para garantir maior oferta de alimento e acesso à água, mantendo a saúde e a produtividade do rebanho.

O Colégio Politécnico é uma Unidade de Educação Básica, Técnica e Tecnológica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), prevista no Estatuto Geral da instituição. A instituição oferece, atualmente, Ensino Médio, 18 cursos técnicos, 4 tecnológicos e 2 cursos de pós-graduação. Dentro desta diversidade de Cursos, a Zootecnia de Precisão está relacionada diretamente com o Curso Técnico em Zootecnia e Agropecuária. Além disso, ela também é abordada nos Cursos Técnico em Agricultura, Técnico em Agricultura de Precisão e Mestrado Profissional em Agricultura de Precisão.

Com isso, a instituição possui uma área agrícola de uso didático-experimental, denominada de Área Agropecuária, onde o Laboratório de Bovinocultura de Corte realiza atividades práticas de manejo para os cursos técnicos. Nessa área, são desenvolvidas diversas ações de Ensino, Pesquisa, Extensão e Inovação ao longo do ano, o que consolida o Colégio Politécnico como um polo de geração e difusão de tecnologias para o mercado de trabalho na área de zootecnia e agricultura de precisão.

No atual ano de 2025, foram implementados brincos de rastreabilidade animal nas novilhas (animais de 24 meses) do laboratório com o propósito de rastrear e analisar dados da saúde e desempenho dessas fêmeas. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo apresentar



ISBN 978-65-990392-6-3

o relato de experiência do Laboratório de Bovinocultura de Corte do Colégio Politécnico da UFSM com a zootecnia de precisão.

2 RELATO DE EXPERIÊNCIA

2.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DA EXPERIÊNCIA

Na Área Agropecuária do Colégio Politécnico da UFSM, são desenvolvidos projetos de Ensino, Pesquisa e Extensão, vinculados aos cursos da área das Ciências Agrárias da instituição. Esses projetos têm como objetivo sensibilizar e capacitar alunos e produtores quanto à importância da sustentabilidade, produtividade e uso de tecnologias no campo, abrangendo tanto a pecuária quanto a agricultura.

Na área destinada à agricultura de precisão dentro da Área Agropecuária do Colégio Politécnico da UFSM (Figura 1), com cerca de 80 hectares, destaca-se a rotação de culturas, com ênfase no uso de culturas de inverno como trigo, canola, aveia e mix de cobertura, e culturas de verão como soja, milho e arroz. Todas as áreas estão sendo manejadas com tecnologias da Agricultura de Precisão desde 2010, obtendo nesses 15 anos de resultados nas safras que se passaram e segue sendo dinâmica e ativa na utilização de maquinários e tecnologias disponíveis no mercado atual brasileiro.

Entre as tecnologias adotadas, destacam-se o uso de:

- Pulverizadores autopropelidos com aplicação localizada de insumos e bioinsumos;
- Sensoriamento remoto por meio do índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index);
- Manejo de plantas daninhas com o uso de drones de imagem, entre outras ferramentas digitais.

Essas práticas têm permitido aumento significativo na eficiência da produção, promovendo uma integração entre inovação tecnológica, conservação ambiental e formação profissional de excelência.

Figura 1 - Localização da área experimental em Santa Maria.



Fonte: Google Earth (2025)

Já, na área destinada à pecuária de precisão, disposta em cerca de 100 hectares, ocorre a produção de bovinos de corte da raça Braford, em um total de 140 animais, de diferentes categorias. A raça Braford se destaca por sua pelagem vermelha com a cara branca (Figura 2),

ISBN 978-65-990392-6-3

característica herdada da raça Hereford. Entre suas principais qualidades estão a boa habilidade materna, resistência ao calor e tolerância a parasitas, o que a torna ideal para regiões de clima tropical (ABHB). Além disso, apresenta excelente adaptação tanto ao pastejo intensivo quanto aos sistemas de semi-confinamento, mantendo bom desempenho produtivo e reprodutivo mesmo em condições desafiadoras.

O uso dos animais para essa experimentação foi autorizada pela comissão de Ética do Uso de Animais da UFSM para o avanço de pesquisas na área de conhecimento, principalmente na área animal. Os profissionais, sendo docentes e os alunos têm consciência de que os animais são seres sencientes e que possuem sensibilidade similar à humana no que se refere à dor, memória, angústia e instinto de sobrevivência, esses animais que foram submetidos ao experimento tiveram livre acesso a água na mangueira, antes de entrar no brete, a colocação dos brincos foi feita nos horários que não havia tanta movimentação na área agropecuária para não ocorrer acidentes e também estresse aos animais, logo após a colocação dos sensores foram liberados nas áreas correspondentes ao experimento.

As atividades destacadas são:

- Uso de balança digital;
- Manejos sanitários;
- Manejos reprodutivos;
- Manejo nutricional;
- Manejo de identificação em épocas de nascimento e desmama dos animais;
- Utilização de Brincos-sensores para monitoramento de um lote de animais jovens.

Figura 2 - Novilha com rastreador.



Fonte: Autores (2025)

2.2 PROBLEMÁTICA ENCONTRADA

Na atual cadeia produtiva pecuária, inserir novas tecnologias nos processos produtivos é uma necessidade e uma vantagem competitiva para o produtor rural. No entanto, nota-se que em muitos momentos a pecuária brasileira é instável devido a questões simples de serem

ISBN 978-65-990392-6-3

resolvidas ou até mesmo devido à falta do conhecimento de todo o sistema da propriedade. Se percorrermos as propriedades, principalmente região sul, mais conhecida como região do Pampa, veremos da mais antiga forma de manejar um animal até a mais atual, o que traz instabilidades ao sistema produtivo.

Quando se tem um olhar de melhorias na propriedade, o produtor sabe que existem ferramentas que vão auxiliar no aumento e na qualidade de sua produção. Para isso, o produtor deve se convencer de que muitas vezes a tecnologia inovadora nem sempre vai ser um computador ou a internet, mas sim um simples manejo que pode ser implementado.

Na pecuária atual, notoriamente são vistos problemas, porém ignorados com facilidade ou por motivos econômicos, tais como: falta de monitoramento dos animais, problemas reprodutivos, problemas sanitários recorrentes, manejo de altura de pastagem ideal, saúde dos animais, bem-estar, localização dos animais dentre outros problemas rotineiros. Praticamente todos os produtores têm acesso a informações através de assistências técnicas das cooperativas que são associados, dos Médicos Veterinários, Zootecnistas, Técnicos e das empresas que produzem ferramentas e produtos para o sistema produtivo.

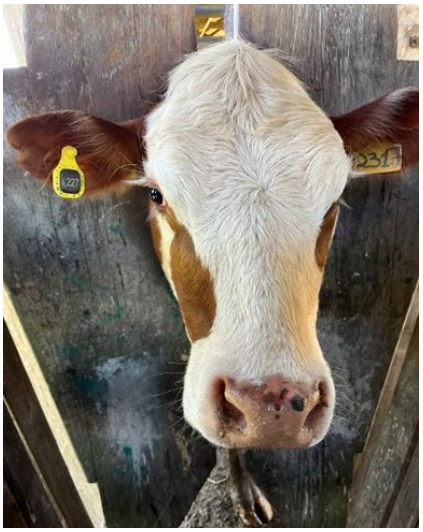
Hoje em dia, quem trabalha com pecuária sabe que não há mais espaço para improviso e amadorismo. O mercado está cada vez mais exigente, e para se manter competitivo é preciso produzir mais, com qualidade, e gastar menos. Para isso, o uso de novas tecnologias no campo deixou de ser um luxo e passou a ser uma necessidade. É nesse cenário que surge a zootecnia de precisão, uma ferramenta moderna que ajuda a controlar melhor todo o processo de produção, evitando perdas e melhorando os resultados.

Na prática, a zootecnia de precisão usa equipamentos, sensores e até mesmo técnicas simples de manejo para monitorar a saúde, o comportamento e a produção dos animais em tempo real. Isso permite que o produtor tome decisões mais rápidas e certeiras. Por exemplo: identificar uma vaca doente antes que ela pare de produzir, ou ajustar a alimentação de forma mais eficiente, sem desperdício.

2.3 CONDUÇÃO DA EXPERIÊNCIA

Sabendo da importância das ferramentas de monitoramento remoto dentro da zootecnia de precisão, o Laboratório de Bovinocultura de Corte do Colégio Politécnico da UFSM, em conjunto com uma empresa gaúcha, conduziu um experimento com 30 fêmeas jovens (terneiras), brincado-as na orelha direita para contabilização de passos (Figuras 3 e 7).

Figura 3 - Fêmea jovem na mangueira pós-colocação do brinco.



Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

No laboratório de bovinocultura de corte, animais selecionados foram colocados na área de pastagem de inverno de aveia e azevém, onde tem aproximadamente 9,05 hectares (Figura 4), possui bebedouro de cimento (Figura 8), sendo fornecido rotineiramente sal mineral para manutenção e estabilidade de peso. Esses animais pesam em média 450 kgs, com uma média de idade de 1 ano e 6 meses e um dos principais objetivos para colocar os brincos foi facilitar a procura desses animais nessa área por GPS, além de avaliar a saúde pela quantidade de passos que cada animal faz por dia. Essa informação auxilia no manejo sanitário e produtivo, visto que um animal que caminha menos que a média pode estar com alguma alteração (cascos, tristeza parasitária bovina, cio e parto)

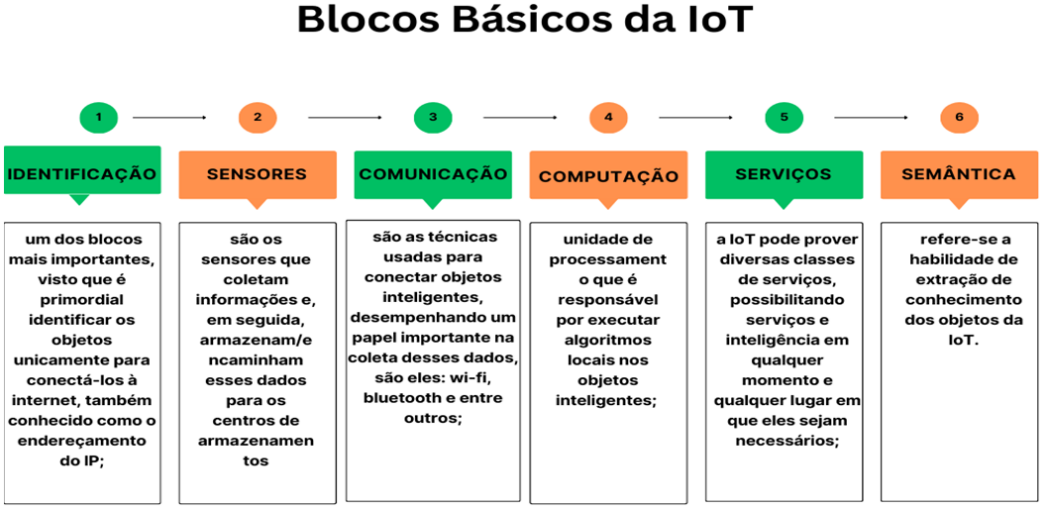
Figura 4 - localização da área experimental e área delimitada onde foram colocados os animais.



Fonte: Google Earth (10/03/2025)

Visando entender a aplicabilidade da zootecnia de precisão dentro deste estudo, é importante ressaltar que a Internet das Coisas pode ser compreendida como a combinação de diferentes tecnologias, de modo que são complementares no sentido de viabilizar a integração dos objetos no meio ambiente físico ao mundo virtual (Figura 9). Na IoT, existem seis blocos básicos que nos ajudam a entendê-la (SANTOS et al., 2016, p. 06), como demonstrado na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma da IoT.

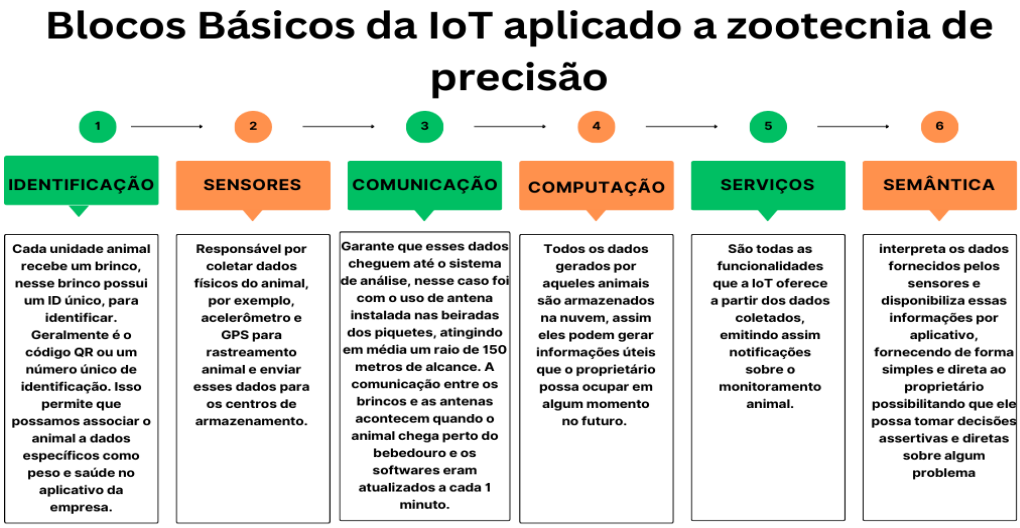


Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

Os blocos básicos da IoT podem nos ajudar a entender como é a funcionalidade dos brincos, como demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma da IoT com funcionalidade do brinco.



Fonte: Autores (2025)

Figura 7 - Sistema de identificação.



Fonte: Autores (2025)

Figura 8 - Sistema de antena da empresa para conectar.



Fonte: Autores (2025)

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 9 - Aplicativo de Monitoramento disponibilizado pela empresa



Fonte: Autores (2025)

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o relato de experiência apresentado, tornou-se evidente o quão importante é a aplicação na prática da zootecnia de precisão e o quão útil ela pode ser dentro de um sistema extensivo, semi-intensivo e intensivo, tornando-o mais prático, fácil e acessível a qualquer produtor adotar essas práticas em sua propriedade.

Além disso, o relato evidenciou o vínculo que uma empresa fez com o laboratório de bovinocultura de corte do Colégio Politécnico da UFSM, a fim de mostrar a eficácia do uso dos brincos de monitoramento, que auxiliaram na avaliação e controle dos animais identificados. Essa parceria permitiu demonstrar aos alunos, professores, visitantes e produtores que o uso dos brincos é uma ferramenta já utilizada e que se pode ter acesso facilmente. Esta ferramenta sofre alterações e atualizações constantemente, mostrando evolução contínua do equipamento que é utilizado de forma simples em um rebanho de bovinos e com uma remoção simples caso ocorra alguma situação adversa no animal.

A zootecnia de precisão mostra que a tecnologia não vem para complicar, mas sim para facilitar a rotina no campo. Ao usar ferramentas como brincos de monitoramento, sensores e softwares simples, o produtor consegue acompanhar de perto a saúde, a nutrição, a reprodução e até o comportamento dos animais. Isso permite identificar rapidamente quando algo não vai bem, como uma vaca doente ou um problema de alimentação, evitando prejuízos maiores.

Além disso, essas tecnologias ajudam a economizar tempo e dinheiro, já que reduzem o desperdício de insumos, melhoram o manejo das pastagens e aumentam a produtividade do rebanho. Outro ponto importante é o bem-estar animal, que passa a ser monitorado de forma contínua, garantindo que os animais estejam em boas condições para produzir mais e com qualidade.

Portanto, fica claro que a zootecnia de precisão não é apenas uma novidade, mas sim uma necessidade real para o produtor que deseja crescer, se manter competitivo no mercado e ter uma pecuária mais sustentável e eficiente

ISBN 978-65-990392-6-3

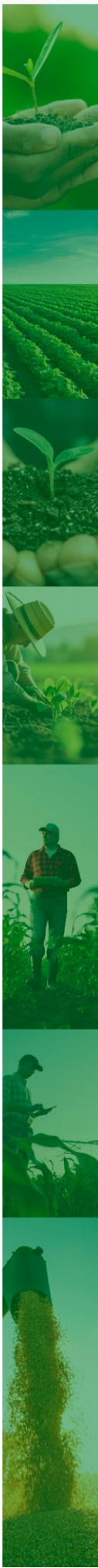
Por fim, entende-se que esse experimento realizado em parceria com o Laboratório de Bovinocultura de Corte e aplicando a zootecnia de precisão fomenta o uso das tecnologias da IoT para facilitar a ‘’lida do campo todos os dias’’. O monitoramento da saúde e a rastreabilidade dos animais possibilita que as perdas econômicas sejam menores e que haja o melhoramento do bem-estar animal. As análises dos dados coletados ao longo do tempo podem ajudar os profissionais a identificar padrões e tendências do animal, possibilitando a implementação de medidas preventivas mais eficazes e personalizadas a realidade do campo e para cada produtor rural.

REFERÊNCIAS

SANTOS, B. P et al. Internet das coisas: da teoria à prática. **Minicursos SBRC Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**, v. 16, 2016.

SEVEGNANI, K. B et al. **Tecnologia e Inovação na Agricultura**: aplicação, produtividade e sustentabilidade em pesquisa. Zootecnia de precisão: Desafios para a produção animal, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE HEREFORD E BRAFORD (ABHB). **As raças**. Disponível em: https://www.abhb.com.br/. Acesso em: 17 set. de 2025.



CAPÍTULO 87

USO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E IMAGEM TERMAL EM *Eucalyptus robusta* APÓS INCIDÊNCIA DE GEADAS

USE OF VEGETATION INDEXES AND THERMAL IMAGING IN Eucalyptus robusta PLANTS AFTER FROST INCIDENCE

Pedro Lopes Trevisan[1]; Hendrick da Costa de Souza[1]; Lucio de Paula Amaral[1]; Ezequiel Gasparin[1]; Henrique Araujo Barichello[1]; Micheli Reis da Rocha[1]; Maria Isabel Borelli Teixeira[1]; João Batista Cassol Ferreira[1]; Gustavo Ferreira Vedooto[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima nº 1000, 97105-900, Santa Maria – Rio Grande do Sul, Brasil, pedrollopest@gmail.com, hendrick.souza@acad.ufsm.br, lucio.amaral@ufsm.br, ezequiel.gasparin@ufsm.br, henrique.araujo@acad.ufsm.br, micheli.reis@acad.ufsm.br, maria.borelli@acad.ufsm.br, jbcf.sm@gmail.com, engflorestalgustavovedootof@gmail.com

RESUMO

Este estudo buscou avaliar a tolerância à geada em progênies de *E. robusta* utilizando sensoriamento remoto com aeronaves remotamente pilotadas (RPAs) e Índices de Vegetação (IVs). A pesquisa foi conduzida em área experimental da UFSM com 98 progênies provenientes do acervo genético do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF). Foram utilizadas imagens RGB, multiespectrais para cálculo dos IVs, NDRE e PSRI, relacionados ao vigor, estado fisiológico, senescência foliar e estresse por geada. Também foram obtidas imagens termais para inspeção da temperatura nas plantas. Os resultados demonstraram que a integração de RPAs e IVs é eficiente na detecção de diferenças de temperatura, que possuem correlação com NDRE e PSRI. Plantas com temperaturas elevadas têm valores de NDRE e PSRI que indicam estresse após a ocorrência de geadas.

Palavras-chave: Termografia. NDRE. PSRI.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate frost tolerance in *E. robusta* progenies using remote sensing with remotely piloted aircraft (RPAs) and vegetation indices (VIs). The research was conducted in an experimental area at UFSM with 98 progenies from the genetic collection of the Forestry Research and Study Institute (IPEF). RGB and multispectral images were used to calculate the VIs NDRE and PSRI, which are related to plant vigor, physiological status, leaf senescence, and frost stress. Thermal images were also obtained to inspect plant temperatures. The results demonstrated that integrating RPAs and VIs is effective in detecting temperature differences, which correlate with NDRE and PSRI. Plants with elevated temperatures exhibited NDRE and PSRI values indicative of stress after frost events.

Keywords: Thermography. NDRE. PSRI.

1 INTRODUÇÃO

Eucalyptus robusta Sm. (Myrtaceae), espécie originária da Austrália, foi introduzida no Brasil com finalidade comercial. A espécie apresenta densidade básica aos seis anos de 418 quilogramas por metro cúbico (JESUS et al., 2017), apresentando potencial de utilização para madeira serrada, lenha, construção de pilares, postes e cercas. Em seu local de origem é encontrada em ambientes com alta umidade (SILVA et al., 2023). Contudo, a região sul do Brasil

ISBN 978-65-990392-6-3

apresenta ocorrência de geadas, fator climático que pode influenciar no desenvolvimento de *E. robusta* (HIGA et al., 1997).

Pesquisas evidenciam a importância da seleção de progênies de *Eucalyptus robusta* que aliem elevado vigor em crescimento à capacidade de adaptação a diferentes condições edafoclimáticas, atributo essencial no contexto de mudanças climáticas (VIGNERON et al., 2018). A identificação de genótipos estáveis e produtivos em múltiplos ambientes possibilita a formação de florestas mais resilientes, possibilitando maior sustentabilidade econômica e ambiental aos sistemas de produção florestal (RESENDE et al., 2016).

Os danos por geada decorrem do congelamento do material vegetal que existe nos espaços intercelulares, ocasionando ruptura das membranas em razão da compressão e o extravasamento irreversível do citoplasma celular, e quanto menos a planta estiver adaptada à baixas temperaturas, mais graves são os efeitos causados pelo congelamento dos tecidos (HIGA et al., 1995). As plantas estão sujeitas a estresses de natureza reversível ou irreversível (LARCHER, 2000), desencadeados por fatores abióticos (FERREIRA; MILANI, 2002; TAIZ; ZEIGER, 2017). A reversibilidade desses estresses decorre da plasticidade dos organismos em tolerar tensões, o que implica em alterações fisiológicas temporárias que retornam ao estado normal após o término do agente estressante. No entanto, em condições mais intensas, pode ocorrer uma tensão plástica, caracterizada por modificações permanentes que resultam em danos severos ou até na morte da planta (JIANG et al., 2025).

Tradicionalmente, a avaliação dos danos causados por geadas em plantios florestais é realizada por meio de inspeções visuais em campo, baseadas na observação direta de sintomas nas plantas. Embora amplamente utilizada, essa abordagem apresenta limitações, como a subjetividade das avaliações, o elevado tempo demandado e a dificuldade de monitorar grandes áreas. Com o avanço tecnológico, especialmente no sensoriamento remoto, tornou-se possível realizar esse monitoramento de forma mais precisa, rápida e em larga escala, utilizando aeronaves remotamente pilotadas (RPAs) equipadas com sensores capazes de capturar informações espectrais relacionadas ao estado fisiológico das plantas.

As aeronaves remotamente pilotadas (RPAs) vêm se destacando no setor florestal, principalmente devido seu baixo custo operacional e alta intensidade de coleta de dados, capacidade de embarcar uma ampla gama de sensores capazes de serem adaptados para fins específicos, possibilidade de planejar campanhas de aquisição de dados, evitar condições climáticas inadequadas e garantir disponibilidade sob demanda e uso em operações em tempo real (SOARES et al., 2024). Por meio das imagens obtidas por sensores embarcados em RPAs, podem ser calculados Índices de Vegetação (IVs), a partir da combinação entre os dados da reflectância para as bandas do espectro visível, sendo estas azul, vermelho e/ou verde (RGB) (GITELSON et al., 2002) e, no espectro do Infravermelho Próximo (NIR). Estes índices podem fornecer *insights* para a estimativa de parâmetros biofísicos, como vigor, biomassa, área foliar e conteúdo de clorofila, o que auxilia no monitoramento fitossanitário e estresse em plantios florestais, assim como na avaliação de produtividade (HUETE et al., 2002).

Um dos índices de vegetação que pode ser utilizado é o NDRE (*Normalized Difference Red Edge*), também chamado de índice de vegetação por diferença normalizada da borda do vermelho ou do vermelho limítrofe. O NDRE é utilizado para avaliar os níveis de clorofila nas plantas. Esse índice é especialmente eficaz em fases mais avançadas do desenvolvimento vegetal, onde o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) apresenta limitações por saturação. O NDRE se baseia na banda do "red edge" (borda do vermelho) para identificar variações fitossanitárias e na biomassa das plantas. Trata-se de um comprimento de onda penetrante que alcança camadas mais profundas das folhas e permite a detecção precoce de alterações fisiológicas e estruturais (BARNES et al., 2000). Os valores de NDRE geralmente variam de -1 a +1, com valores mais altos indicando vegetação mais vigorosa e saudável

ISBN 978-65-990392-6-3

(BARNES et al., 2000). O NDRE foi utilizado na realização da diagnose nutricional de *Eucalyptus saligna* (SILVA et al., 2025), destacando-se como um dos IVs com melhor desempenho na caracterização da variabilidade nutricional.

Outro importante índice é o Índice de Reflectância de Senescência de Plantas (PSRI). Constitui-se em um índice espectral amplamente empregado no âmbito do sensoriamento remoto para a avaliação da senescência da vegetação. Tal índice fundamenta-se na relação entre a diminuição dos teores de clorofila e o aumento relativo de outros pigmentos, como os carotenoides, além de considerar a influência do solo exposto (MERZLYAK et al., 1999). Seus valores também variam de -1 a +1, tendendo a aumentar para valores positivos durante o processo de senescência foliar, à medida que o teor relativo de carotenoides supera o de clorofilas (FILELLA; PENUELAS, 1994; JENSEN, 2007; SILVA et al., 2025). O PSRI apresenta relevância significativa em investigações voltadas ao monitoramento agrícola e florestal, uma vez que possibilita a detecção de alterações fisiológicas nas plantas, a identificação de condições de estresse hídrico e nutricional, bem como a análise de áreas em processo de degradação ou com predomínio de solo descoberto (ZARCO-TEJADA et al., 2000). No contexto florestal, esse índice pode se mostrar particularmente útil em estudos com plantios de eucalipto, possibilitando a estimativa de pigmentos foliares e a caracterização da senescência e do vigor fisiológico das árvores. Nesse sentido, o PSRI consolida-se como uma ferramenta relevante para análises de produtividade florestal, avaliação de estresses ambientais e apoio ao planejamento do manejo sustentável.

Há na literatura trabalhos que relacionam IVs com parâmetros fisiológicos para outras espécies do gênero *Eucalyptus*. De Almeida et al. (2015) estimaram IVs para o híbrido *Eucalyptus grandis* x *urophylla*, os quais correlacionaram-se com o IAF (Índice de Área Foliar). No entanto, para *E. robusta* ainda faltam estudos que relacionem IVs com a fitossanidade e vigor de plantas, tampouco em relação ao impacto de danos abióticos, como àqueles causados pela geada. Para este último objetivo, os sensores com melhores resultados são os que possuem, além das bandas do espectro visível (RGB), as dos espectros não visíveis pelo olho humano, como a banda NIR. Porém, RPAs embarcadas com esses sensores possuem custos maiores, o que abre margem para utilização de aeronaves portadoras apenas dos sensores RGB, e utilização de índices de vegetação que utilizem apenas estas bandas (VIANA et al., 2020).

O uso de imagens espectrais obtidas por RPAs tem se mostrado uma ferramenta estratégica nesse processo, pois permite o monitoramento preciso e em escala dos efeitos da geada, por meio do cálculo de índices de vegetação, que favorecem diagnósticos rápidos e não destrutivos, auxiliando na tomada de decisão e adoção de práticas de manejo mais eficiente. Nesse contexto, a avaliação de parâmetros genéticos e a correlação entre a tolerância à geada e características de crescimento são fundamentais para a seleção de progênies mais adaptadas

O objetivo deste trabalho foi avaliar a tolerância à geada em progênies de *Eucalyptus robusta* por meio da análise de índices de vegetação (NDRE e PRSI) obtidos através do sensoriamento remoto em RPAs e sua correlação com dados de temperatura foliar, visando identificar estresse e apoiar a seleção de materiais genéticos tolerantes.

2 RELATO DE EXPERIÊNCIA

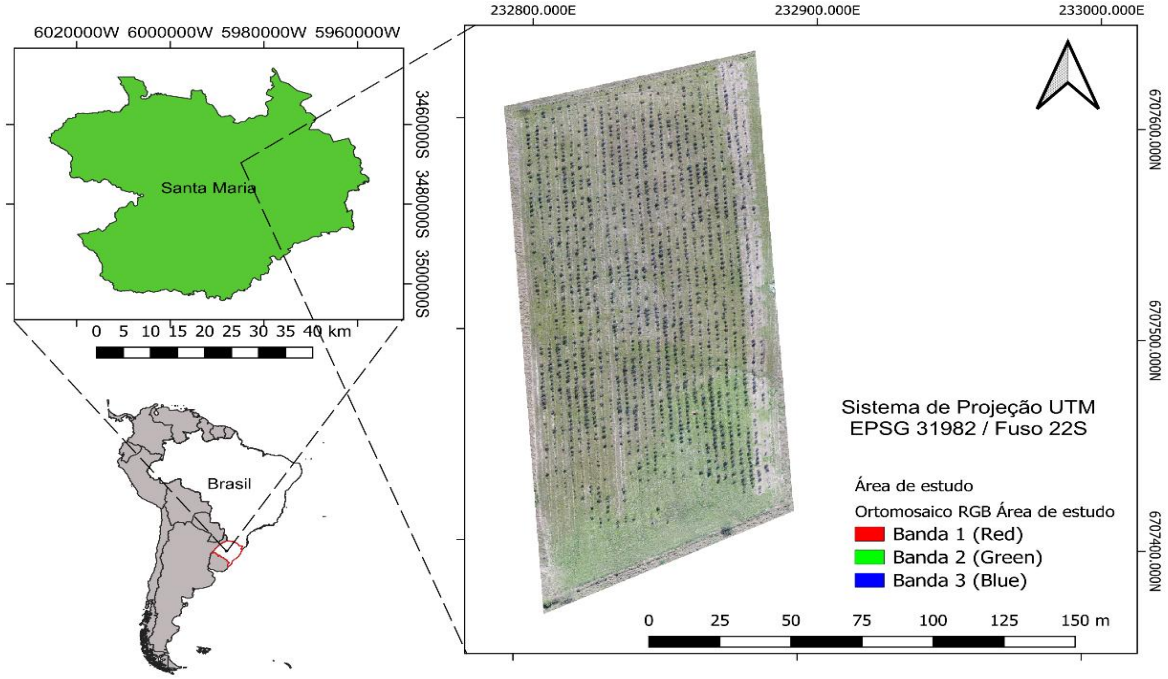
2.1 Descrição da área de estudo

O experimento foi conduzido em área experimental do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) – Campus Sede UFSM, localizado

ISBN 978-65-990392-6-3

no município de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil (29°44'2,11" S; 53°45'43,51" O) – Figura 1. A implantação do teste de progênies ocorreu em junho de 2024. O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, com 98 progênies de *Eucalyptus robusta* distribuídas em cinco blocos, compostos por parcelas lineares de cinco plantas por progênie, totalizando 2.450 plantas, acrescido de uma linha de bordadura O material genético avaliado foi constituído por progênies de múltiplas procedências, pertencentes ao acervo genético do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF).

Figura 1 - Localização do teste de progênies com *E. robusta* – agosto de 2025.



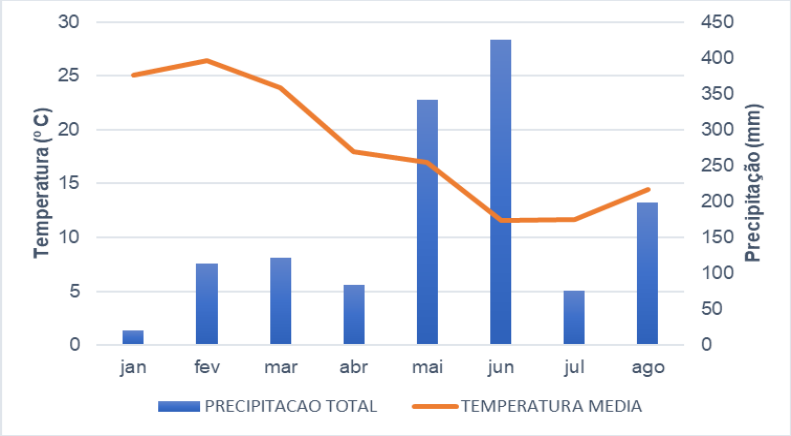
Fonte: Autores (2025).

O município de Santa Maria apresenta altitude média de 100 metros, clima do tipo Cfa, segundo a classificação de Köppen, caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos frios, com umidade relativa média do ar entre 74% e 78%. A precipitação média no mês de agosto varia entre 190 e 210 mm (WREGE et al., 2011) e a temperatura média foi de 20°C (INMET, 2025). No mês de julho de 2025 a temperatura mínima registrada pela estação meteorológica de Santa Maria foi de -1,8 °C, classificada como moderada pelo INMET. As temperaturas médias, para os meses de junho a agosto, não superaram 15 ºC, conforme apresentado no climograma a seguir (Figura 02).

O solo foi classificado como Planossolo Háplico Distrófico, com horizonte superficial ácido (pH entre 4,3 e 4,5) e presença de elevação do lençol freático em períodos de precipitação. Apresenta saturação hídrica durante o inverno, período de maior pluviosidade na região, e ressecamento acentuado no verão, refletindo intensa variabilidade hídrica sazonal. Na área de estudo o uso anterior da terra era pastagem natural para pecuária de corte, atividade tradicional no RS.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 2 - Climograma contendo a temperatura média mensal (º C) e a precipitação acumulada para os meses de janeiro a agosto de 2025.



Fonte: INMET (2025)

2.2 Coleta, Processamento e Análise de dados

Para a coleta dos dados, foi realizado um vôo no dia 27 de agosto de 2025 com a aeronave remotamente pilotada *Phantom 4 Advanced Plus DJI* (possui rádio controle com tela integrada), com o sensor RGB e embarcado de forma adaptada o sensor multiespectral *RedEdge-MX* (*Micasense*). Também foi realizado um segundo voo com a RPA *Mavic 3 Enterprise Thermal DJI*, que possui embarcado sensor termal e RGB, para obtenção de imagens termais utilizadas para inspeção de temperatura nas plantas de *E. robusta*.

A RPA *Phantom 4 Advanced Plus* possui uma câmera RGB modelo FC6310, distância focal de 8,8 mm, placa geradora da imagem de 5472 x 3648 pixels, tamanho de *pixel* de 2,41 µm. O plano de voo programado para esta RPA foi elaborado no aplicativo *Precision Flight* versão 2.4.2 instalado no rádio controle, com o qual também foi realizado o voo. Foi utilizado sobreposição lateral de 65%, sobreposição frontal de 75%, altura de voo 50 metros a partir do *home point* (*Abouve Ground Leavel - AGL*), com velocidade de 10 m/s. Após o processamento das imagens RGB foi obtido um *pixel* projetado no terreno (*Ground Sample Distance - GSD*) de 1,30 cm por *pixel*.

A câmera *RedEdge-MX* possui cinco bandas espectrais, sendo azul (475 nm com largura de banda de ± 20 nm), verde (560 nm ±20 nm), vermelho (668 nm ±10 nm), borda do vermelho (717 nm de ±10 nm) e infravermelho próximo (NIR 840 nm ±40 nm). Além disso, possui distância focal de 5,5 mm, placa geradora da imagem de 1280 x 960 *pixels* e tamanho de *pixel* de 3,75 µm. Após o processamento das imagens multiespectrais foi obtido um *pixel* projetado no terreno (*Ground Sample Distance - GSD*) de 6,13 cm por *pixel*.

O sensor dispõe de um painel de calibração de reflectância e o *Sun Shine Sensor*, que registra a variação de luminosidade no momento de aquisição das imagens. Ambos os recursos foram utilizados no processamento das imagens multiespectrais. No momento antes de iniciar o voo foram coletadas imagens do painel de calibração com a câmera multiespectral, disposto sobre o solo, com incidência de luz e sem haver incidência de sombra.

A obtenção das imagens multiespectrais considerou a altura de voo e a velocidade da RPA para determinar o tempo mínimo de acionamento da câmera *RedEdge-MX*, que geralmente não deve ser inferior ou igual a um segundo. O tempo de acionamento utilizado foi de 1,35 segundos. Ao ligar a câmera, ela possibilita conexão *wireless*, dispõe de IP próprio (http://192.168.10.254), *login* e senha. Possibilita executar no navegador de *internet* do

ISBN 978-65-990392-6-3

smartphone/tablet um aplicativo próprio para a sua configuração de funcionamento, pelo qual foi calculado e configurado o tempo de acionamento para obtenção das imagens multiespectrais, com acionamento no *modo timer*.

O horário dos voos, para ambas as RPAs, foi entre 11h e 12h30min, com isso, os dados de interesse foram coletados em partes da copa das plantas de *E. robusta* não sombreadas, face leste. Para calibração de reflectância das imagens multiespectrais foram obtidas imagens do painel de calibração RP04-1901003-SC (*Micasense*), que possui os seguintes fatores de calibração para as bandas azul (0,514), verde (0,515), vermelho (0,514), borda do vermelho (0,513) e infravermelho próximo (0,511).

A partir do vôo, foram obtidas imagens RGB e multiespectrais, que foram processadas com o auxílio do *software Agisoft Metashape*. Com as imagens RGB processadas foi obtido um ortomosaico, utilizado para a identificação das plantas de interesse para coleta de dados. Com o processamento das imagens multiespectrais foram calculados os índices espectrais de vegetação por diferença normalizada da borda do vermelho – NDRE, e de senescência de plantas – PSRI.

A RPA *Mavic 3 Enterprise Thermal DJI* possui autonomia de 45 minutos de voo, velocidade máxima de 21 m/s e suporta rajadas de vento de até 12 m/s. Possui sensor RGB modelo *M3T* (4,4mm), com distância focal de 4,4 mm, placa geradora de imagem com 4000x3000 *pixel*, *pixel* com tamanho de 1,59 µm. Possui câmera termográfica modelo *M3T* (9,1mm), com distância focal de 9,1 mm, placa geradora de imagem com 640x512 *pixel*, *pixel* com tamanho de 12 µm, suporta a medição da temperatura de ponto e área. O plano de voo foi realizado no aplicativo *DJI Pilot 2,* disponível de fábrica em seu rádio controle. A altura de voo foi de 60 m a partir do *home point* (*Abouve Ground Leavel - AGL*), com recobrimento longitudinal e lateral de 75 e 70 %, respectivamente. As imagens termais apresentaram GSD de 8,40 cm/*pixel*.

O índice NDRE foi utilizado para mensuração da variação do vigor vegetativo das plantas. O NDRE foi calculado através da seguinte equação (1) (BARNES et al., 2000):

$$\frac{(NIR - Red\ Edge)}{(NIR + Red\ Edge)} (1)$$

Onde: *NIR* - banda espectral do Infravermelho Próximo, *Red Edge* - banda espectral da borda do vermelho, banda estreita no espectro entre o vermelho visível e o infravermelho próximo.

Para o PSRI foi utilizada a seguinte equação (2) (MERZLYAK et al., 1999):

$$PSRI = \frac{(Red - Green)}{NIR} (2)$$

Onde: *GREEN* - banda espectral verde, *RED* - banda vermelha, *NIR* - banda do Infravermelho Próximo.

Para obter os valores de temperatura nas imagens termais, foi utilizado o programa *DJI Thermal Analysis Tool 3*, com uso de técnicas de inspeção, com as quais sobre as plantas de *E. robusta* de interesse foram obtidos os valores de temperatura (valor mínimo, médio e máximo). Para facilitar a coleta de dados foi utilizada a paleta de cores do tipo *Arctic*, para destacar as plantas de eucalipto em relação à entrelinha com plantas espontâneas roçadas, e uso da ferramenta de coleta de dados no formato *circle temperature*, delimitada na parte iluminada da copa. Os dados foram inseridos em uma planilha eletrônica, juntamente com os dados dos IVs

ISBN 978-65-990392-6-3

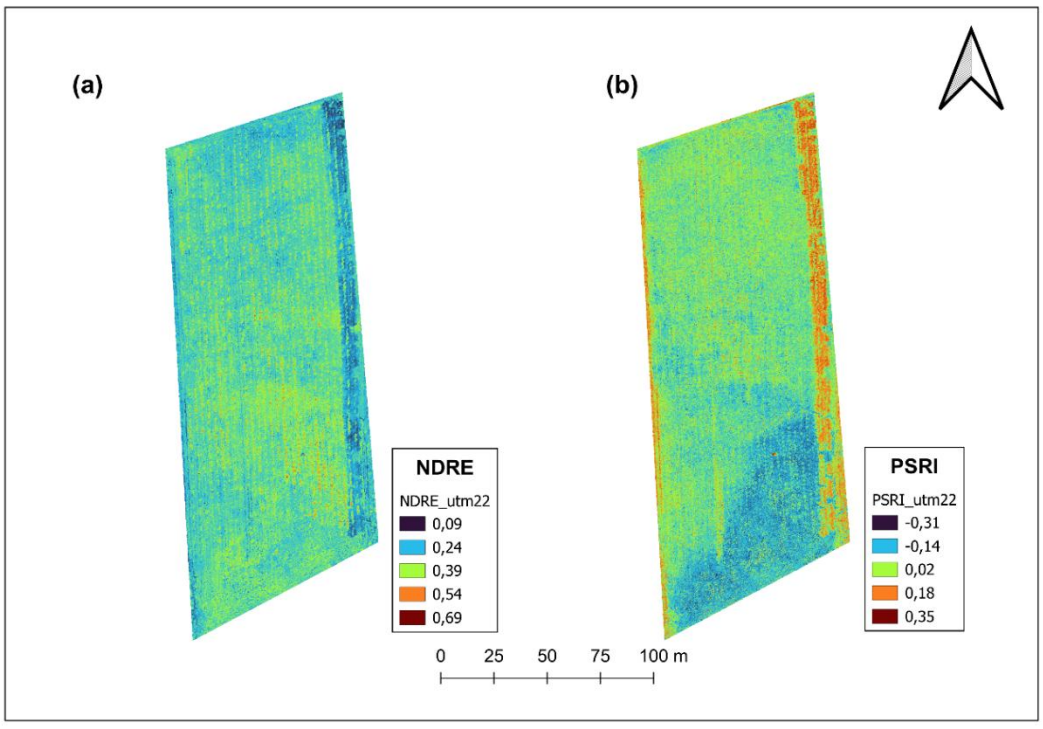
NDRE e PSRI, das mesmas plantas, obtidos nos ortomosaicos grados com as imagens multiespectrais.

Foi realizada análise de estatística descritiva, teste de normalidade de Shapiro-Wilk, análise de correlação de Pearson e regressão dos dados obtidos, com uso do programa Sigmaplot 11.0. Para tanto, os dados de temperatura foram obtidos nas plantas de interesse nas imagens termais, em 12 plantas selecionadas ao acaso, identificadas no ortomosaico RGB, que apresentavam danos provocados pela geada (copa arroxeada). Com o auxílio do *software* QGIS, foram obtidos os valores para os IVs NDRE e PSRI, na projeção da copa das plantas de *E. robusta*, com a ferramenta *identify*, enquanto os valores para a temperatura (mínima, média e máxima) foram obtidas a partir do *software DJI Thermal Analysis Tool 3*. Os valores foram tabulados em planilha eletrônica, sendo então estimados os coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre os IVs e as diferentes temperaturas a partir deste conjunto de dados.

2.3 Resultados obtidos

Foram obtidos ortomosaicos na área de estudo, em 27 de agosto de 2025, para os índices espectrais de vegetação NDRE e PSRI, gerados com as imagens multiespectrais do sensor *RedEdge-MX* (Figura 3), que tem capacidade de capturar a variação de comportamento de plantas de *E. robusta* após ocorrências de geadas.

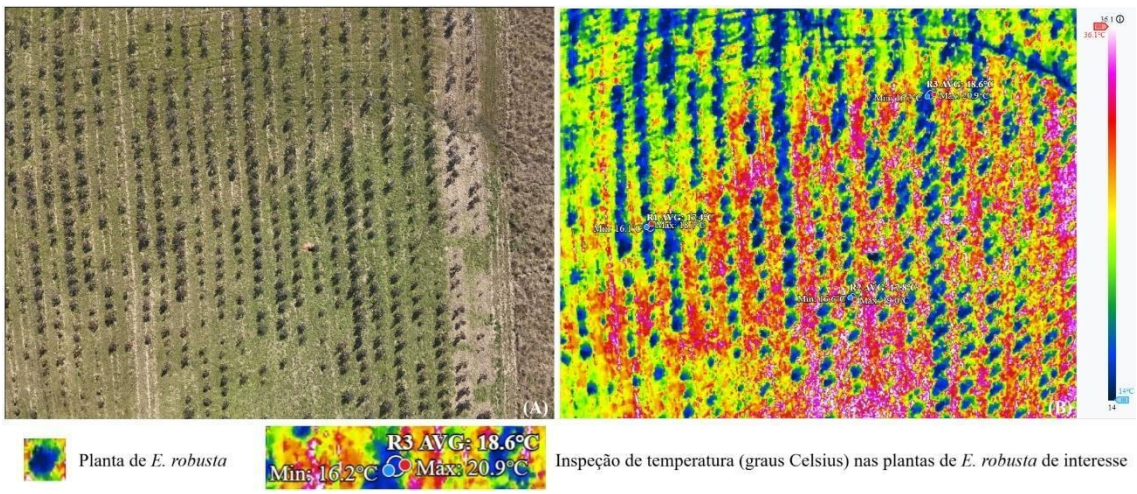
Figura 3 – Ortomosaico composto pelos Índices de Vegetação NDRE (a) e PSRI (b) para o teste de progênies com *E. robusta.*



Fonte: Autores (2025).

A Figura 4 ilustra a imagem RGB e a termal, coloridas com a paleta de cores *arctic* para destacar as copas das plantas de *E. robusta*, obtidas como os sensores embarcados na RPA *Mavic 3 Enterprise Thermal DJI*, com detalhes da coleta dos dados de temperatura nas plantas de interesse.

Figura 4 – Comparação entre a imagem RGB e Termal para o teste de progênies com *E. robusta*.



Fonte: Autores (2025).

As estatísticas descritivas para os valores dos IVs e temperatura para plantas de *E. robusta* resumem os dados utilizados (Tabela 1). Os dados apresentaram baixa variabilidade e normalidade (média, moda e mediana dos valores foram próximos). O teste de normalidade de Shapiro-Wilk (W; p-valor) mostrou que os dados dos IVs e temperatura apresentam normalidade.

Tabela 1 – Estatística descritiva para o IVs NDRE e PSRI e para temperaturas mínima, média e máxima de *E. robusta*.

Estatísticas	**NDRE**	**PSRI**	**T_{min} (°C)**	**T_{med} (°C)**	**T_{max} (°C)**
Média	0,40	-0,08	17,82	19,68	21,52
Erro padrão	0,02	0,01	0,20	0,40	0,72
Mediana	0,41	-0,07	17,80	19,15	20,90
Modo	Amodal	Amodal	17,70	Amodal	Amodal
Desvio padrão	0,05	0,04	0,69	1,40	2,51
Variância da amostra	0,00	0,00	0,48	1,97	6,28
CV (%)	13,40	-50,87	3,87	7,13	11,65
Curtose	2,95	-0,48	-0,19	-1,48	-1,30
Assimetria	-1,49	-0,03	-0,08	0,30	0,42
Intervalo	0,20	0,13	2,40	4,10	7,00
Mínimo	0,27	-0,14	16,60	17,80	18,60
Máximo	0,46	-0,01	19,00	21,90	25,60
Nível de confiança(95.0%)	0,03	0,02	0,44	0,89	1,59
Teste de Normalidade W	0,874	0,985	0,979	0,917	0,914
p-valor	0,073	0,996	0,981	0,264	0,238

Fonte: Autores (2025).

A correlação obtida entre os IVs e as temperaturas mínima, média e máxima nas plantas de *E. robusta* apresentaram valores significantes (Tabela 2). Verificou-se variações na magnitude das correlações entre os dois IVs e as temperaturas mínimas, médias e máximas. As menores correlações foram obtidas entre os IVs e a temperatura mínima. Para as demais temperaturas, tanto o PSRI quanto o NDRE apresentaram correlações moderada (>0,3) a forte (>0,5) ou muito forte (>0,7) (HOWELL, 2012).

ISBN 978-65-990392-6-3

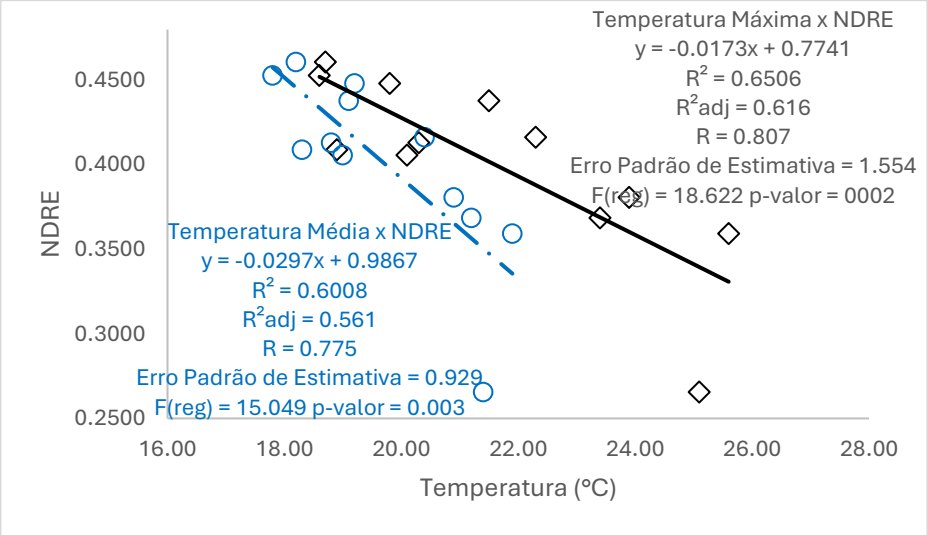
Tabela 2 - Coeficiente de correlação linear de Pearson para os IVs NDRE e PSRI e as temperaturas mínima, média e máxima de *E. robusta.*

	NDRE	***PSRI***	***Tmin (°C)***	***Tmed (°C)***	***Tmax (°C)***
NDRE	1				
PSRI	-0,27^{ns}	1			
Tmin (°C)	-0,20 ^{ns}	0,38 ^{ns}	1		
Tmed (°C)	-0,78**	0,59**	0,51 ^{ns}	1	
Tmax (°C)	-0,81**	0,55**	0,31 ^{ns}	0,97***	1

Legenda: ***:** p < 0,05, ****:** p < 0,01, ***: p < 0,001, **ns** : (p-valor ≥ 0,05).
Fonte: Autores (2025).

Para o PSRI a correlação foi positiva com a temperatura, sendo classificada como moderada para a temperatura mínima e forte para as demais temperaturas. Para o NDRE, no entanto, a correlação foi negativa, sendo classificada como fraca para a temperatura mínima, alta para a temperatura média e muito alta para a temperatura máxima. As plantas com valores de temperatura mais elevada sugerem a ocorrência de estresse. Os menores valores de NDRE para estas mesmas plantas corroboram com o estresse térmico, ou seja, danos por geada (Figura 5).

Figura 5 - Correlação entre o NDRE e as temperaturas média e máxima das plantas de *E. robusta*.



Fonte: Autores (2025).

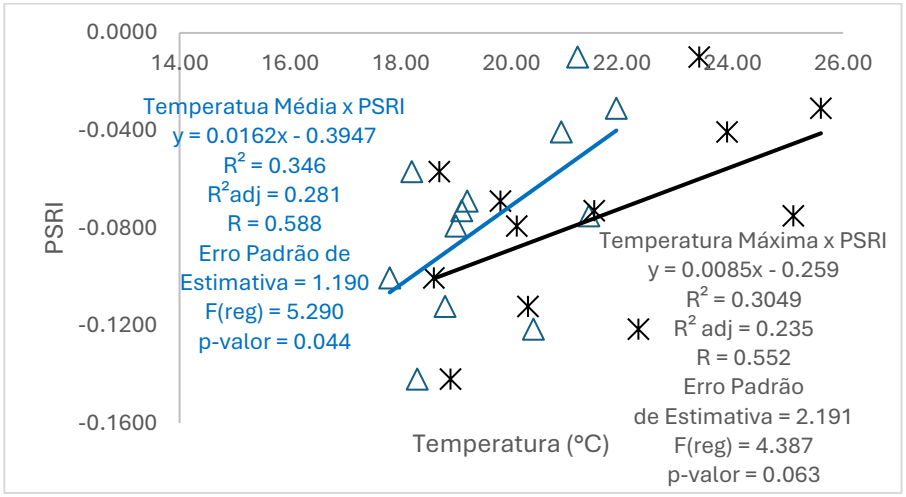
As plantas com maior temperatura após a ocorrência de geada exibiram PSRI elevado, ou seja, sinal de senescência e estresse. Esse padrão é coerente, pois folhas com maior temperatura (menos resfriadas após a geada) podem refletir um metabolismo alterado e maior nível de estresse, elevando o PSRI (Figura 6).

Os coeficientes de correlação obtidos apresentam padrões específicos de resposta da vegetação florestal ao estresse pós-geada, onde os índices PSRI e NDRE detectaram diferentes aspectos de danos ocasionados pelo frio. A correlação positiva do PSRI com a temperatura (r = 0,4 - 0,6) é consistente com processos de estresse e degradação de clorofila que ocorrem após eventos de baixa temperatura (MATILLA et al., 2018). Eventos de geada causam injúrias aos

ISBN 978-65-990392-6-3

tecidos, incluindo danos ao aparato fotossintético, resultando na degradação preferencial de clorofilas em relação aos carotenoides fotoprotetores (CHEN et al., 2024). Este processo é detectável pelo PSRI através do aumento da razão carotenoides/clorofila, que se intensifica com temperaturas mais elevadas após o evento de geada, acelerando os processos de recuperação e senescência foliar.

Figura 6 - Correlação entre o PSRI e as temperaturas média e máxima das plantas de *E. robusta*.



Fonte: Autores (2025).

Os padrões de correlação observados no presente estudo estão de acordo com os resultados verificados em outros trabalhos sobre o efeito da geada no aparato fotossintético das plantas. Segundo Higa et al. (1995), o congelamento dos líquidos intercelulares e a ruptura de membranas celulares são os principais mecanismos de dano, que afetam diretamente os pigmentos fotossintéticos. A correlação positiva do PSRI com temperaturas mais elevadas após a geada reflete um aumento na razão carotenoides/clorofila, típico de processos de senescência e degradação de clorofilas (FILELLA; PEÑUELAS, 1994; CHEN et al., 2024). O NDRE, por outro lado, mostrou redução em plantas com maiores valores de temperatura, considerando que esse índice é sensível à diminuição dos teores de clorofila foliar e ao comprometimento do vigor vegetativo (BARNES et al., 2000).

Além do que já foi observado, é interessante considerar que as distintas intensidades das correlações entre os índices de vegetação (PSRI e NDRE) e as temperaturas mínima, média e máxima refletem não só diferenças de dano físico, mas também a capacidade de recuperação metabólica das plantas. Temperaturas mínimas negativas tendem a causar lesões mais severas nas membranas celulares e nos tilacoides, levando a rupturas que demandam energia e recursos “extras” para reparos metabólicos e celulares. Em contraste, temperaturas médias e máximas elevadas após a geada podem aumentar a taxa de reações oxidativas, estresse hídrico secundário ou aumento da demanda respiratória, o que exacerba a degradação de pigmentos como a clorofila, favorecendo o acúmulo de carotenoides como mecanismo de fotoproteção (BAYER; KRAUSE, 1986).

Oberschelp et al. (2020) realizaram estudos de adaptação ao frio com *Eucalyptus benthamii*, *E. dunnii* e *E. grandis*, que mostraram que a capacidade de tolerância varia bastante entre espécies, sendo E. benthamii a mais resistente dentre as três citadas. Conforme os autores, as partes mais suscetíveis aos danos da geada são as folhas e brotações jovens, que podem sofrer necrose, danos à fotossíntese, e até morte de ramificações. À campo, nas plantas de *E. robusta* foram observados danos como arroxeamento e queima nas folhas, além de mortalidade de plantas. Estes sintomas provavelmente estão associados à ocorrência de geadas no

ISBN 978-65-990392-6-3

município de Santa Maria nos meses de junho e julho. Para junho, houve registro de um evento de geada no dia 25/06/2025, de intensidade moderada (temp. mínima de 1,8 ºC), enquanto em julho houve dois eventos (dias 01 e 02/07) de intensidade forte (temp. mínima de -1,8 ºC) (INMET, 2025).

Sabe-se que *E. robusta* é uma espécie nativa de ecossistemas costeiros em sua área de ocorrência natural, que se estende desde Nova Gales do Sul até o sul de Queensland, ocorrendo predominantemente no nível do mar até altitudes de 90 m. Nessa região, as temperaturas mínimas nos meses mais frios variam de 6º a 13 ºC e eventos de geada são pouco frequentes ou quase não ocorrem (EMBRAPA, 1988), contrastando com as condições edafoclimáticas do local do teste de progênies e as temperaturas mínimas registradas para os eventos de geada, inferiores àquelas para onde *E. robusta* é nativo. No entanto, Chen, Biglin e Yang (1987) afirmam que, *E. robusta* pode recuperar-se de eventos ocasionais de geada mais intensa, sendo o principal fator limitante para seu desenvolvimento temperaturas mínimas inferiores a -7 ºC. Nos dias de geada intensa, as mínimas não foram inferiores a -1,8 ºC, o que pode ter minimizado a severidade das geadas e favorecido a sobrevivência das progênies de *E. robusta.*

A análise integrada dos índices de vegetação evidencia indicadores precoces de tolerância ou suscetibilidade a geada que podem ser associados a variabilidade genética de progênies de *E. robusta*, visando oferecer subsídios para estratégias de seleção de genótipos superiores, manejo e monitoramento mais preciso em áreas suscetíveis a esse estresse abiótico. Esses indicadores permitem identificar padrões fisiológicos associados à resiliência ou vulnerabilidade das plantas, possibilitando orientar programas de melhoramento genético, seleção de progênies mais adaptadas, bem como decisões de implantação e manejo de plantios em regiões suscetíveis ao estresse térmico ocasionado por baixas temperaturas.

Assim, a combinação de índices espectrais de vegetação oferece uma visão mais abrangente das respostas fisiológicas pós-geada, possibilitando identificar não apenas danos visíveis, mas também alterações no metabolismo das plantas. Essa abordagem é particularmente útil para programas de melhoramento, pois permite selecionar precocemente indivíduos de *E. robusta* com maior tolerância a eventos estressores, otimizar custos de avaliação e aumentar a eficiência dos ensaios de campo.

Nesse sentido, a utilização de ortomosaicos gerados a partir de índices de vegetação torna a avaliação de ensaios genéticos mais prática, ao permitir o monitoramento simultâneo de muitas plantas e a identificação de diferentes intensidades de estresse e danos causados pela geada. Isso reduz a necessidade de observações visuais extensas em campo, diminui o tempo de execução dos experimentos e, consequentemente, gera economia de recursos humanos e financeiros sem comprometer a qualidade das informações obtidas.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de ortomosaicos de índices de vegetação e RGB obtidos a partir de imagens geradas por sensores embarcados em RPAs (sensores RGB e multiespectrais), acrescidos de imagens termais, demonstram ser uma ferramenta eficaz para avaliação da tolerância à geada em *Eucalyptus robusta*.

Os índices NDRE e PSRI mostraram-se sensíveis às alterações fisiológicas pós-geada, refletindo, respectivamente, redução do teor de clorofila e o aumento do estresse foliar.

Essa abordagem pode viabilizar a identificação de progênies mais tolerantes às condições de baixas temperaturas, subsidiar estratégias de manejo, como monitoramento de estresse e mortalidade de plantas, em áreas de plantio comercial e nos programas de melhoramento genético. Além disso, a aplicação de tecnologias de sensoriamento remoto com

ISBN 978-65-990392-6-3

RPAs (SR suborbital) pode reduzir custos e tempo de avaliação, contribuir para a sustentabilidade e competitividade do setor florestal.

AGRADECIMENTOS

Ao projeto Aquarius pela disponibilidade da câmera multiespectral *RedEdge-MX (Micasense)* utilizada no estudo.

Ao IPEF pelo fornecimento do material genético (progênies de *E. robusta*) utilizado na instalação do experimento na UFSM.

Ao professor Ezequiel Gasparin e ao pós-graduando Pedro Lopes Trevisan, pelo acesso ao experimento e parceria para a continuidade desta pesquisa.

À Secretaria de Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação do estado do Rio Grande do Sul (SEAPI-RS) pela disponibilidade da RPA *Mavic 3 Enterprise termal* DJI, durante a atividade de capacitação e treinamento de técnicos da SEAPI, realizados pelos docentes do Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão da UFSM, Luíz Felipe Diaz de Carvalho e Lúcio de Paula Amaral). Os procedimentos realizados neste trabalho com as imagens termais podem ser utilizados pelos técnicos da SIAPE-RS em levantamentos de dados com a RAP *M3T DJI*.

Ao professor Lúcio de Paula Amaral pela disponibilidade da RPA *Phantom 4 Advanced Plus*, utilizada para a realização dos voos com o sensor multiespectral.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. Q. de et al. Índice de Área Foliar de *Eucalyptus* estimado por índices de vegetação utilizando imagens TM – Landsat 5. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 3, p. 368-376, 2015.

BARNES, E. M. et al. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. In: **Proceedings of the fifth international conference on precision agriculture**, Bloomington, MN, USA. 2000. p. 6.

BAYER, R. S.; KRAUSE, G. H. Freezing damage and frost tolerance of the photosynthetic apparatus studied with isolated mesophyll protoplasts of Valerianella locusta L. **Photosynthesis Research**, v. 8, n. 2, p. 161-174, 1986.

CHEN, BINGLIN, e JUNTAO YANG. Frost injury of Eucalyptus associated with an unusually cold winter in Yunnan Province. In **Plant cold hardiness**. p. 361-362. Alan R. Liss, Inc., New York. 1987

CHEN, C. et al. Effect of temperature on photosynthetic pigment degradation during freeze–thaw process of postharvest of celery leaves. **Horticulturae**, v. 10, n. 3, p. 267, 2024.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Florestas, Curitiba, PR. **Zoneamento ecológico para plantios florestais no Estado de Santa Catarina**, por Antonio Aparecido Carpanezzi e outros. Curitiba, EMBRAPA CNPF, 1988.

FERREIRA, F. A.; MILANI, D. **Diagnose visual e controle das doenças abióticas e bióticas do eucalipto no Brasil**. Mogi Guaçu: International Paper, 2002. 98 p.

FILELLA, I.; PENUELAS, J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, n. 7, p. 1459-1470, 1994.

GITELSON, A. A. et al. Novel Algorithms for Remote Estimation of Vegetation Fraction. **Remote Sensing of Environment**, 80, 76-87, 2002.

HIGA, R. C. V. et al. Comportamento de 20 espécies de *Eucalyptus* em área de ocorrência de geadas na região Sul do Brasil. In: CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTUS, 1997, Salvador. **Proceedings**... Colombo: EMBRAPA-CNPF, 1997. p. 106-110.

HIGA, A. R.; GARCIA, C. H.; SANTOS, E. T. dos. Geadas, prejuízos à atividade florestal. **Silvicultura**, São Paulo, v. 16, n. 59, p. 40-43, jan./fev. 1995.

HOWELL, D. C. **Statistical Methods for Psychology**. 8th ed. Belmont: Cengage Learning, 2012.

HUETE, A. R. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, n.83, p.195-213, 2002

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). **Dados Meteorológicos do BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos de Estações Automáticas)**. portal.inmet.gov.br/.2025

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2007.

JESUS, M.S. et al. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus***. Floresta**, v.47, n.1, p. 11-16, 2017.

JIANG, Z. et al. Mechanisms of plant acclimation to multiple abiotic stresses. **Communications Biology**, v. 8, n. 655, p. 1-15, 2025.

LARCHER, W. Plantas sob estresse. In: LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2000. p. 341-430.

MERZLYAK, M. N. et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia Plantarum**, v. 106, n. 1, p. 135-141, 1999.

MATTILA, H.; et al. Degradation of chlorophyll and synthesis of flavonols during autumn senescence: the story told by individual leaves. **Environmental and Experimental Botany**, v. 155, p. 1–10, 2018.

OBERSCHELP, G. P. J. et al. Cold acclimation and freezing tolerance in three *Eucalyptus* species: A metabolomic and proteomic approach. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 154, p. 316-327, 2020.

RESENDE, M. D. V. et al. **Melhoramento genético de espécies florestais: fundamentos e avanços para o aumento da produtividade de madeira e sustentabilidade dos plantios**. Colombo: Embrapa Florestas, 2016.

SILVA, P. H. M. et al. **Recursos genéticos de eucalipto nas estações experimentais de ciências florestais da ESALQ**: usos e manutenção**.** Piracicaba, SP: IPEF, 2023.

SILVA, S. D. P. et al.. Sensoriamento remoto por espectrorradiometria aplicada ao diagnóstico nutricional *em Eucalyptus saligna* Smith. **Observatório de La Economía Latinoamericana**, v. 23, n. 8, p. e11053, 2025.

SOARES, G. B. et al. Revisão acerca da utilização de aeronaves remotamente pilotadas (RPA) na indústria da mineração. **Revista Foco**, v. 17, n. 8, p. e6015 , 2024.

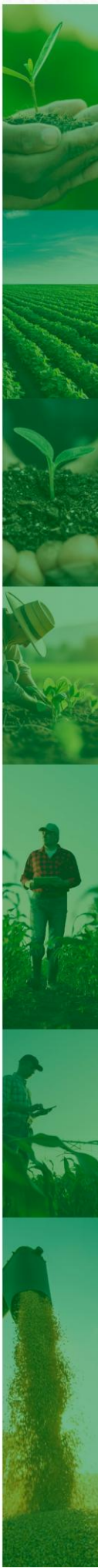
ISBN 978-65-990392-6-3

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal.** 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. p. 888.

VIANA, S. W. S. et al. **Análise visual de índices de vegetação utilizando imagens RGB para classificação de áreas de pastagens com presença de plantas invasoras.** In: Semana Nacional de Ciência e Tecnologia, 15., 2020, Boa Vista, RR. Inteligência Artificial: a nova fronteira da ciência brasileira: Boletim de resumos. Boa Vista, RR, 2020.

WREGER, M. S. **ATLAS CLIMÁTICO DA REGIÃO SUL DO BRASIL: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Brasília, DF: Embrapa, 2012.

ZARCO-TEJADA, P. J.; MILLER, J. R.; MOHAMMED, G. H. Chlorophyll fluorescence effects on vegetation apparent reflectance: II. Laboratory and airborne canopy-level measurements with hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, p. 596–608, 2000.



CAPÍTULO 88

USO DE RPA COM LIDAR H800 PARA INVENTÁRIO FLORESTAL DE EUCALIPTO NO SUL DO BRASIL

Use of RPA with lidar h800 for eucalyptus forest inventory in southern Brazil

Modalidade: Descrição de Caso Técnico

Guilherme Coelho de Pellegrini[1]; Lúcio de Paula Amaral[2]; Gustavo Vedooto[1], Gessieli Possebom[1], Thales Augusto Ulrich[1], Rafael Rocha Ribeiro[1], Ciro Giusti Galiano[1], Maria Fernanda Kunz Stangarlin[1]

[1] GPCAD Engenharia e Topografia, Endereço, CEP, Santa Maria – RS, Brasil, guilherme@gpcad.com.br, engflorestalgustavovedootof@gmail.com, gessieli@gpcad.com.br, thales.a.ulrich@gmail.com, rafael.rocha.ribeiro@gmail.com, ciro@gpcad.com.br, mariafernandakunz56@gmail.com
[2] Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima nº 1000, 97105-900, Santa Maria – RS, Brasil, lucio.amaral@ufsm.br.

RESUMO

O setor florestal brasileiro tem no eucalipto uma de suas principais bases produtivas, dada a elevada produtividade e a ampla aplicação da madeira em diferentes segmentos industriais. Nesse contexto, o escâner a laser aerotransportado (Airborne Laser Scanning – ALS) surge como ferramenta promissora, pois fornece dados tridimensionais da estrutura do dossel, permitindo a derivação de métricas altamente correlacionadas com o volume e a biomassa. Este estudo tem como objetivo demonstrar a capacidade dos métodos ALS e TLS de obtenção de variáveis dendrométricas básicas em plantios de Eucalyptus, destacando o potencial dessas tecnologias a partir dos dados obtidos e da acurácia associada aos sistemas embarcados, compostos por receptores GNSS, unidades inerciais de medição (IMU) e sensores a laser. Os resultados apontam que o ALS é capaz de gerar estimativas consistentes de volume, desde que associado a modelos hipsométricos locais e a protocolos de calibração adequados. Dessa forma, a tecnologia se apresenta como alternativa eficiente e inovadora para modernizar os inventários florestais, contribuindo para o manejo sustentável e a tomada de decisão no setor.

Palavras-chave: *Eucalyptus*; LiDAR; sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Eucalyptus is one of the main productive bases of the Brazilian forestry sector, given its high productivity and widespread use in various industrial sectors. In this context, airborne laser scanning (ALS) emerges as a promising tool, as it provides three-dimensional data on canopy structure, allowing the derivation of metrics highly correlated with volume and biomass. This study aims to demonstrate the ability of ALS and TLS methods to obtain basic dendrometric variables in Eucalyptus plantations, highlighting the potential of these technologies based on the data obtained and the accuracy associated with embedded systems, composed of GNSS receivers, inertial measurement units (IMU) and laser sensors. The results indicate that ALS can generate consistent volume estimates, provided it is combined with local hypsometric models and appropriate calibration protocols. Thus, technology presents itself as an efficient and innovative alternative for modernizing forest inventories, contributing to sustainable management and decision-making in the sector.

Keywords: Eucalyptus, LiDAR, remote sensing.

ISBN 978-65-990392-6-3

1 INTRODUÇÃO

O eucalipto (*Eucalyptus sp*) é uma das espécies florestais mais cultivadas no Brasil, devido à sua elevada produtividade, versatilidade de uso e importância econômica para os setores de celulose, papel, energia e madeira sólida. Para o manejo sustentável e a otimização da produção, a determinação precisa do volume de madeira é fundamental, pois subsidia tanto o planejamento de cortes quanto a comercialização e o monitoramento dos estoques (LEITE et al., 2020).

Os métodos tradicionais de inventário florestal, baseados em medições de campo, embora precisos, apresentam alto custo e limitações logísticas quando aplicados em grandes extensões. Nesse contexto, o sensoriamento remoto, em especial o escâner a laser aerotransportado (*Airborne Laser Scanning – ALS* ou *LiDAR* aéreo), tem-se destacado como alternativa tecnológica para estimar variáveis dendrométricas e volumétricas, oferecendo medições tridimensionais do dossel com cobertura contínua (PACKALÉN; MEHTÄTALO; MALTAMO, 2011; RAHLF et al., 2021).

O LiDAR aéreo permite derivar métricas estruturais da floresta, como altura dominante, densidade vertical e perfis do dossel, as quais apresentam forte correlação com biomassa e volume de madeira (RAHLF et al., 2021). Segundo Leite, et. al., (2020), estudos em povoamentos de eucalipto demonstraram que abordagens por área (area-based), baseadas em modelos de regressão calibrados com parcelas de campo, e abordagens por árvore individual (individual-tree detection), que utilizam algoritmos de segmentação da copa, podem gerar estimativas confiáveis, embora com diferentes níveis de acurácia e custo operacional.

No entanto, a aplicação do ALS ainda apresenta desafios metodológicos. Entre os mais recorrentes estão a subestimação de alturas totais, a dificuldade na contagem de árvores em dosséis fechados e a dependência de dados de campo para calibração de modelos hipsométricos que relacionem altura ao diâmetro à altura do peito (DAP) e, consequentemente, ao volume. Oliveira et al. (2014), em estudo realizado em plantios de *Eucalyptus sp*. no Brasil, observaram subestimação média de altura de aproximadamente 5% e subestimação de volume de 11,4% em relação aos registros de entrada de madeira na fábrica. Esses resultados evidenciam a necessidade de protocolos que combinem dados LiDAR de qualidade com inventários de campo representativos.

Adicionalmente, a densidade da nuvem de pontos e a plataforma utilizada influenciam diretamente os resultados. Enquanto voos tripulados permitem inventários em larga escala, os sistemas LiDAR embarcados em RPAs (Remotely Piloted Aircraft), oferecem nuvens de pontos de ultra-alta densidade, favorecendo a individualização de árvores e a extração de atributos por indivíduo, embora restritos a áreas menores (PICOS et al., 2020).

Diante desse contexto, a determinação do volume de madeira em povoamentos de eucalipto por escâner a laser aerotransportado apresenta grande potencial para modernizar os inventários florestais, mas exige estudos que comparem abordagens, calibrem modelos e avaliem as condições ideais de aquisição de dados. O presente trabalho tem como objetivo demonstrar a capacidade dos métodos ALS e TLS de obtenção de variáveis dendrométricas básicas em plantios de *Eucalyptus*, destacando o potencial dessas tecnologias a partir dos dados obtidos e da acurácia associada aos sistemas embarcados, compostos por receptores GNSS, unidades inerciais de medição (IMU) e sensores a laser.

2 DESCRIÇÃO DE CASO TÉCNICO

2.1 RAP E PLANO DE VOO

Trata-se de um trabalho realizado na data de 09/09/2025 no qual a empresa GPCAD, executou um voo com uma RPA, em um povoamento de eucalipto clonal, com idade de 7 anos

ISBN 978-65-990392-6-3

em talhão localizado na cidade de Rosário do Sul. Cidade está pertencente ao estado do Rio Grande do Sul, e de propriedade da Empresa CMPC. O objetivo foi avaliar a viabilidade operacional e a precisão do LiDAR embarcado em voo a 80 metros de altura, sendo complementado com um levantamento TLS com equipamento LiGrip O1 Lite, considerando a densidade da nuvem de pontos necessária para identificação individual de árvores e mensuração indireta de variáveis dendrométricas. Em relação aos procedimentos metodológicos utilizados:

- Equipamento: Scanner LiDAR modelo H800, acoplado a RPA DJI Matrice 350 RTK, multirrotor com pás giratórias (Figura 1 e 2).

Figura 1 – Sensor Laser H800 LiDAR embarcado na RPA DJI Matrice 350 RTK.



Fonte: GPCAD Engenharia e Topografia.

Figura 2 – Sensor Laser H800 LiDAR embarcado na RPA DJI Matrice 350 RTK.

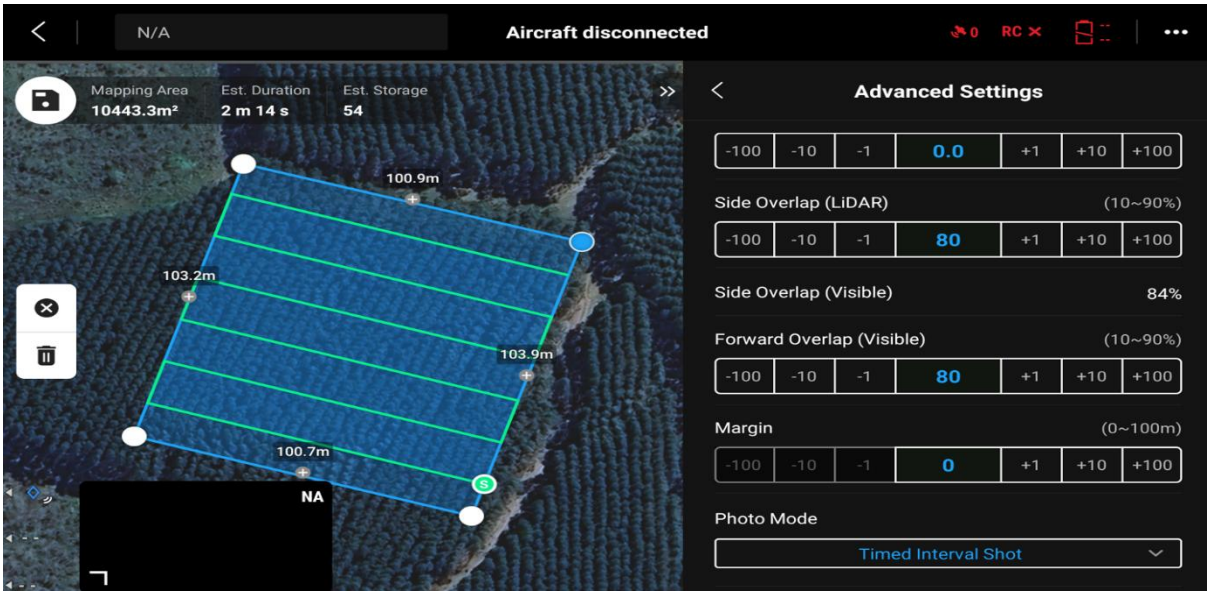


Fonte: GPCAD Engenharia e Topografia.

- Altura de voo: 80 metros, definida para equilibrar cobertura e resolução.
- Planejamento de Voo: Executado no software DJI Pilot 2 (Figura 3 e 4).

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 3 – Planejamento de Voo executado no software DJI Pilot 2.



Autor: GPCAD Engenharia e Topografia.

Figura 4 – Vista frontal da câmera 4K da RPA DJI Matrice 350 RTK.



Fonte: GPCAD Engenharia e Topografia.

- Velocidade de Voo: 6m/s.
- Ângulo de Curso: 107°.
- Localização Geográfica da Área: Latitude -30° 13´ 11,4986˝ e Longitude -54° 43´ 22,0254˝.
- Recobrimento da área: Recobrimento frontal e lateral de 80%.
- Georreferenciamento: Sistema GNSS RTK em modo base-rover, assegurando precisão inferior a 5 cm.

ISBN 978-65-990392-6-3

- Processamento: Segmentação da nuvem de pontos para identificação de copas, mensuração de altura, cálculo de área de copa e estimativa de DAP por modelos alométricos, processados no software LiGeoreference, Lidar 360 MLS, Trimble Business Center e ReCap.

2.2 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO LiGrip O1 Lite

O LiGrip O1 Lite é a última geração de produtos leves da série portátil LiGrip da GVI. Possui design integrado e suporta diversos métodos de mapeamento, incluindo RTK-SLAM, PPK-SLAM e SLAM. Ele pode gerar dados de nuvem de pontos LAZ em tempo real, de alta precisão e em cores reais, com coordenadas absolutas. O LiGrip O1 Lite pode ser equipado com um módulo RTK e um bastão telescópico, tornando-o adequado para aplicações como medição de plantas baixas, levantamento topográfico de minas, medição de estoques e medição de fachadas. Combinado com os softwares LiDAR360 e LiDAR360MLS, ele oferece aos clientes uma solução completa e mais eficiente (Manual GreenValley International LiGrip O1 Lite, 2024).

Parâmetros do sistema:
Dimensões: 184×115×304 milímetros
Capacidade da Bateria: 3450 mAh
Armazenamento: 256 GB
Peso: 1,0 Kg
Laser: Mid360
Precisão de Alcance: 2cm
Comprimento de Onda: 905nm
Faixa de Detecção: 40 m a 10% de refletividade, 70 m a 80% de refletividade

A RPA DJI Matrice 350 RTK (M350 RTK) é uma plataforma aérea não tripulada de uso profissional, voltada para missões de mapeamento, inspeção e levantamento geoespacial de alta precisão. Trata-se de uma evolução da linha Matrice, incorporando robustez, autonomia e integração otimizada com sensores LiDAR.

Suas principais especificações incluem:

- Sistema RTK integrado: fornece posicionamento centimétrico em tempo real, garantindo elevada precisão geoespacial e eliminando a necessidade de pontos de controle em algumas aplicações.
- Tempo de voo: até 55 minutos, dependendo da carga útil e condições climáticas.
- Capacidade de carga: até 2,7 kg, permitindo o transporte de sensores LiDAR, câmeras multiespectrais, hiperespectrais e térmicas.
- Segurança e redundância: sistema triplo de GNSS, múltiplos sensores de visão e radar para evitar obstáculos, além de redundância em componentes críticos.
- Controle e transmissão: alcance de até 20 km com transmissão estável de vídeo e telemetria em tempo real.
- Resistência: certificação IP55, que assegura operação em condições adversas de poeira e chuva leve.
- Integração com softwares: compatível com plataformas de planejamento de voo automatizado, como DJI Pilot 2 e Terra, otimizando a coleta e processamento de dados.

O Laser H800 LiDAR embarcado na RPA DJI Matrice 350 é um sistema de varredura a laser aerotransportado de alta precisão, desenvolvido para aplicações em mapeamento topográfico, florestal e de engenharia. O sensor utiliza tecnologia de emissão de feixes múltiplos

ISBN 978-65-990392-6-3

em alta frequência, possibilitando a aquisição densa de nuvens de pontos tridimensionais, mesmo em áreas de vegetação densa. Entre suas principais características, destacam-se:

- Alcance de detecção:
  - 350 m – 10% de refletividade
  - 790 m - 50% de refletividade
  - 1000 m - 80% de refletividade

- Taxa de varredura: 100,000~2,000,000 pontos por segundo, garantindo elevada densidade da nuvem de pontos.
- Precisão vertical: variando entre 2 – 5 cm, dependendo da altura de voo e das condições ambientais.
- Capacidade de penetração: a partir de 7 retornos, sendo ilimitado de acordo com o cenário de voo, possibilitando a distinção entre copa arbórea, sub-bosque e superfície do solo.
- Integração: sistema GNSS/IMU de alta performance, que assegura a correta georreferenciação dos pontos.
- Aplicações: levantamentos de relevo, estimativa de volume florestal, modelagem digital de terreno (MDT), agricultura de precisão e monitoramento ambiental.

2.3 INTEGRAÇÃO LiDAR H800 + DJI Matrice 350 RTK

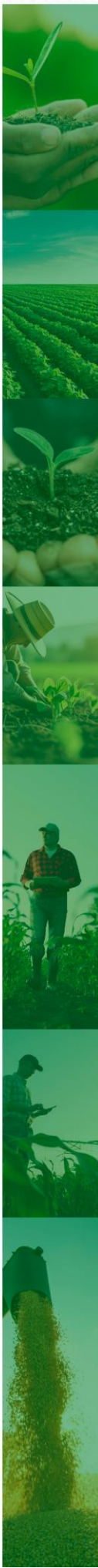
A integração do sensor Laser H800 LiDAR com a RPA DJI Matrice 350 RTK constitui uma solução tecnológica de alto desempenho para levantamentos aerofotogramétricos e LiDAR. A combinação do sensor de alta precisão com o sistema RTK embarcado reduz erros posicionais e assegura resultados com acurácia centimétrica. Essa configuração é amplamente utilizada em:

- Mapeamento florestal: para caracterização da estrutura vertical das florestas, estimativa de volume de madeira e monitoramento do crescimento.
- Agricultura de precisão: permitindo identificar estresse vegetal, analisar variabilidade espacial e gerar modelos digitais de cultivo.
- Engenharia civil e topografia: elaboração de modelos digitais de terreno (MDT), curvas de nível e projetos de infraestrutura.
- Gestão ambiental: monitoramento de áreas degradadas, recuperação de bacias hidrográficas e estudos de cobertura e uso do solo.

Dessa forma, inicialmente foi realizado o levantamento ALS conforme as condições previamente estabelecidas, seguido pelo escaneamento TLS nas entrelinhas de plantio de Eucalyptus do talhão.

As nuvens de pontos resultantes de ambos os processos foram posteriormente registradas e fundidas, permitindo a extração de variáveis dendrométricas básicas, como diâmetro à altura do peito (DAP), contagem de indivíduos, altura total, altura comercial e área de copa. Ressalta-se que a metodologia adotada se fundamentou na elevada precisão absoluta dos equipamentos utilizados, o que possibilitou a obtenção de informações consistentes e adequadas para a análise proposta, podendo ainda assim serem inspecionadas no pátio de fábrica, para validação final.

A combinação desses dois equipamentos representa um avanço significativo no mapeamento aéreo de alta resolução, com ganhos em precisão, eficiência operacional e aplicabilidade científica em múltiplos setores.



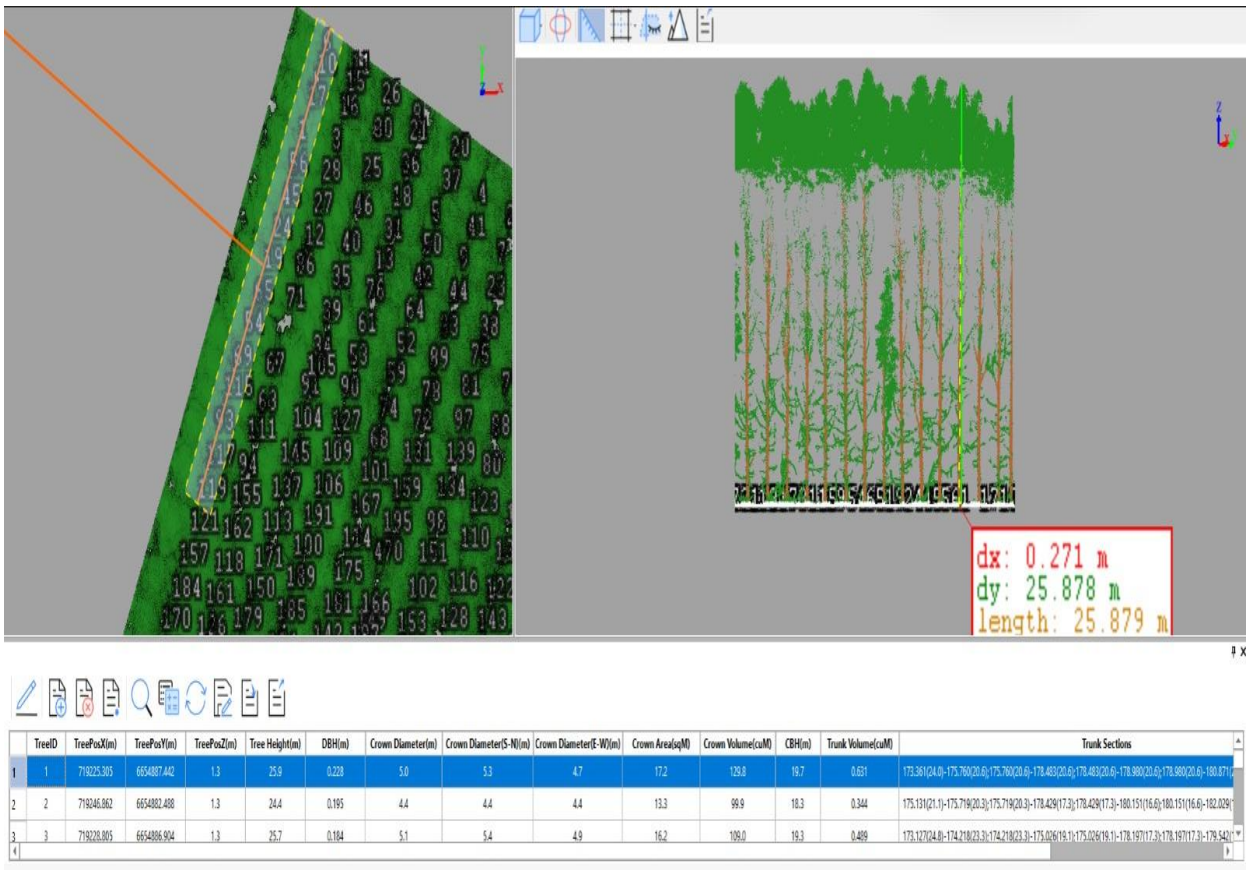
ISBN 978-65-990392-6-3

3 RESULTADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir da análise da nuvem de pontos gerada pelos escaneamentos ALS e TLS, possibilitando a extração de informações dendrométricas com elevado nível de detalhe.

Na Figura 5, é possível observar a representação tridimensional das árvores a partir da integração dos dados obtidos via ALS (*Airborne Laser Scanning*) e TLS (Terr*estrial Laser Scanning*). A análise possibilita a identificação individualizada de cada árvore, com a atribuição de um identificador numérico e a extração das varáveis alturas total e altura comercial. Além disso, a seção vertical à direita da imagem evidencia o perfil das árvores, permitindo uma visualização clara da estrutura florestal, especialmente de remanescente de galhos, fornecendo informações detalhadas que, tradicionalmente, demandariam a medição direta em campo.

Figura 5 – Análise de altura total dos exemplares de Eucalipto.

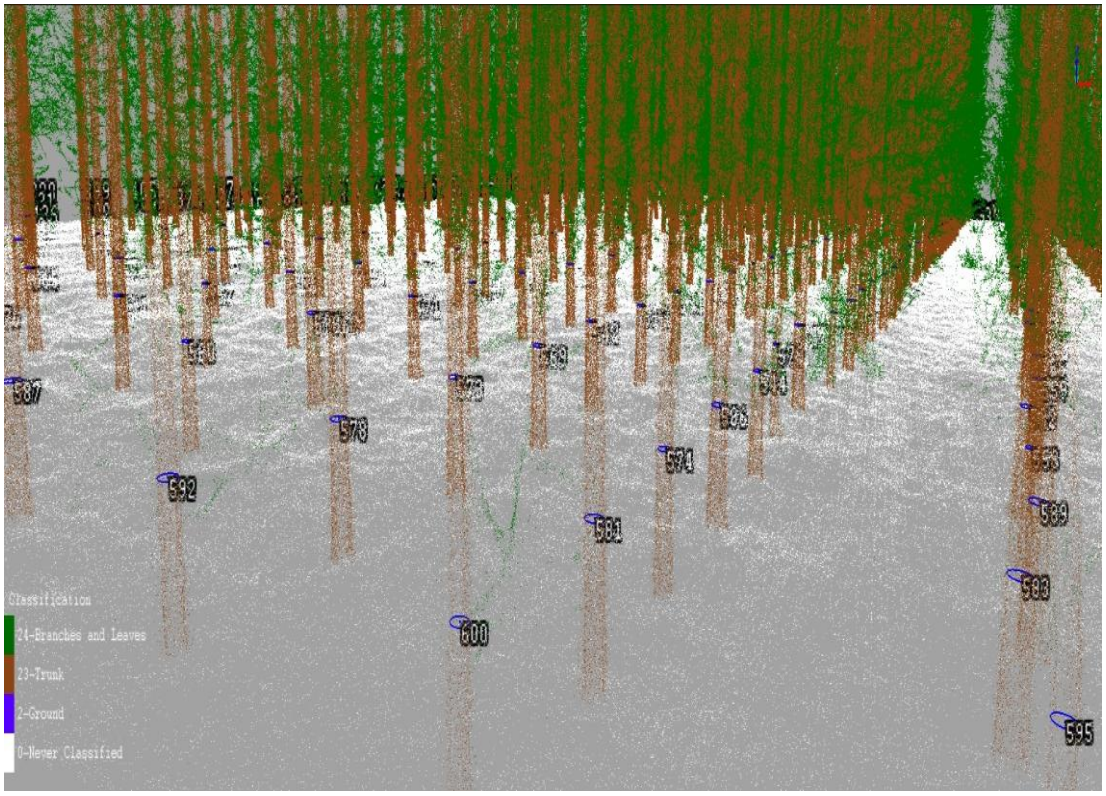


Fonte: GPCAD Engenharia e Topografia.

Na Figura 6, destaca-se a obtenção do parâmetro diâmetro. Cada indivíduo é identificado e marcado na nuvem de pontos com um círculo que corresponde à sua seção transversal, possibilitando não apenas a mensuração do DAP, mas também a obtenção de diâmetros em multiseções, ou seja, em diferentes alturas do fuste. Essa abordagem amplia a possibilidade de estimar o volume com maior precisão, uma vez que permite realizar uma cubagem rigorosa digital, comparável àquela geralmente realizada apenas após a derrubada das árvores.

ISBN 978-65-990392-6-3

Figura 6 – Análise independente de DAP de Eucalipto.



Fonte: GPCAD Engenharia e Topografia.

A integração entre ALS e TLS revela um potencial significativo para o setor florestal. Esses métodos viabilizam a construção de inventários digitais de alta precisão, possibilitando redução de custos e tempo de execução em relação às metodologias tradicionais, além de minimizar a necessidade de intervenções destrutivas na floresta. Com a obtenção de parâmetros como altura, DAP, diâmetros ao longo do fuste, área de copa e volume, cria-se uma base de dados robusta para a modelagem florestal, o manejo sustentável e a tomada de decisão estratégica.

Assim, os resultados evidenciam que a aplicação conjunta de ALS e TLS constitui uma alternativa promissora para o inventário florestal de precisão, permitindo não apenas a mensuração de variáveis clássicas, mas também a incorporação de análises tridimensionais avançadas, que podem revolucionar a forma como se conduz o monitoramento e o planejamento das florestas plantadas.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para as variáveis biométricas dos indivíduos de *Eucalyptus spp.*, derivados da análise da nuvem de pontos integrada dos escaneamentos ALS e TLS. Os valores médios, bem como os intervalos de variação observados, evidenciam a uniformidade estrutural do plantio e refletem características típicas de povoamentos florestais homogêneos. Tais resultados indicam que a população avaliada se enquadra na categoria de médio a alto porte, com padrões de crescimento compatíveis com a espécie e com a idade do plantio.

A altura média dos indivíduos foi de 24,68 m, com valor mediano de 25,50 m, o que denota uma distribuição relativamente simétrica dessa variável no conjunto amostral. O desvio padrão de 2,88 m indica reduzida variabilidade entre as observações, evidenciando baixa dispersão em torno da média e sugerindo elevado grau de homogeneidade silvicultural no povoamento avaliado.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos parâmetros avaliados em indivíduos de *Eucalyptus spp*.

Estatística	Altura (m)	DAP (m)	CAP (m)	D_copa (S-N) (m)	D_copa (E-W) (m)	A_copa (m²)
Média	24,68	0,19	17,85	4,48	4,1	12,39
EPM	0,12	0	0,2	0,03	0,03	0,14
Mediana	25,5	0,19	19,6	4,5	4,1	12,6
Moda	25,7	0,19	19,7	4,7	4,2	13
DP	2,88	0,03	4,58	0,68	0,76	3,27
S²	8,29	0	20,96	0,46	0,58	10,68
CV (%)	11,66	14,82	25,65	15,19	18,61	26,37
Curtose	9,27	0,9	1,99	2,04	1,68	0,74
Assimetria	-2,89	-0,37	1,8	-0,54	0,17	-0,25
Intervalo	18,5	0,23	20,1	5,4	5,7	22,8
Mínimo	9,2	0,09	2,22	1,4	1,4	1,2
Máximo	27,7	0,31	22,3	6,8	7,1	24
Nº de árvores	545	545	545	545	545	545
NC (95,0%)	0,24	0	0,39	0,06	0,06	0,27

Legenda:
DAP: Diâmetro a altura do peito; CAP: Circunferência a altura do peito; D_copa (S-N): Diâmetro da copa na porção Sul-Norte; D_copa (E-W): Diâmetro da copa na porção Leste Oeste; A_copa: Área da copa.
Fonte: Autores (2025)

O diâmetro à altura do peito (DAP) apresentou média de 0,19 m, valor próximo à mediana e ao modo, o que reforça a homogeneidade da amostra. A baixa variabilidade é corroborada pelo desvio padrão de 0,03 m, sugerindo que as árvores apresentam crescimento relativamente equilibrado. Em consequência, a variável derivada, a circunferência à altura do peito (CAP), apresentou média de 17,85 cm, também com baixa dispersão (DP = 4,58 cm).

No que tange à estrutura da copa, observou-se diâmetro médio de copa de 4,26 m, com valores similares para as direções norte-sul (4,48 m) e leste-oeste (4,10 m). A relativa equivalência entre os eixos evidencia copas bem conformadas e pouco assimétricas, reforçando a regularidade do povoamento. A área média de copa foi de 12,39 m², com mediana de 12,60 m², demonstrando consistência entre os valores centrais. Contudo, o desvio padrão de 3,27 m² sugere maior variação na expansão lateral da copa quando comparado ao DAP ou à altura, possivelmente em função de fatores como, disponibilidade de luz e competição por nutrientes. De forma geral, a estatística descritiva evidencia um povoamento florestal homogêneo, com variações discretas nos parâmetros estruturais, especialmente no que se refere à copa. Esses resultados refletem a eficiência do manejo adotado e a adaptabilidade do material genético utilizado.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração entre o levantamento ALS e o TLS, possibilita a coleta de dados geoespaciais de alta acurácia, visto que o sensor laser, associado ao posicionamento RTK, reduz significativamente os erros de georreferenciamento. Essa configuração tecnológica tem sido amplamente aplicada em mapeamento florestal (estimativa volumétrica, modelagem estrutural da vegetação e monitoramento do crescimento), agricultura de precisão e floresta de precisão.

ISBN 978-65-990392-6-3

Este tipo de experiência é particularmente relevante para regiões como o sul do Brasil, onde a silvicultura de eucalipto ocupa grande extensão territorial e apresenta papel estratégico para a economia local e nacional. Ao trazer métricas de qualidade em escala operacional, o LiDAR aerotransportado representa avanço significativo para empresas, agricultores parceiros e pesquisadores da área. O relato demonstra que a integração de LiDAR aerotransportado e GNSS RTK possibilita a estimativa de variáveis dendrométricas com rapidez e precisão, sendo uma alternativa viável às metodologias tradicionais de inventário florestal.

Apesar da necessidade de expertise técnica e investimentos em equipamentos, os benefícios em escala de tempo, confiabilidade dos dados e suporte ao manejo de precisão justificam a adoção crescente dessa tecnologia na Floresta de Precisão.

REFERÊNCIAS

DJI. **Matrice 350 RTK – Specifications**. DJI Enterprise, 2023. Disponível em: https://enterprise.dji.com/matrice-350-rtk. Acesso em: 18 set. 2025.

LEITE, F. P.; SILVA, C. A.; RODRIGUES, T. R.; GOMES, M. F.; OLIVEIRA, L. R. Estimating stem volume in eucalyptus plantations using airborne LiDAR: a comparison of area- and individual tree-based approaches. **Remote Sensing,** v. 12, n. 8, p. 1-19, 2020.

OLIVEIRA, L. T. de; RODRIGUES, T. R.; ZANDONÁ, R. R.; MACEDO, R. L. G. Determinação do volume de madeira em povoamento de eucalipto por escâner a laser aerotransportado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** v. 49, n. 9, p. 703-712, 2014.

PACKALÉN, P.; MEHTÄTALO, L.; MALTAMO, M. ALS-based estimation of plot volume and site index in a *eucalyptus* plantation. **Annals of Forest Science**, v. 68, p. 1085-1092, 2011.

PICOS, J.; BASTOS, G.; MIGUEZ, D.; ALONSO, L.; ARMESTO, J. Individual tree detection in a eucalyptus plantation using unmanned aerial vehicle (UAV)-LiDAR. **Remote Sensing**, v. 12, n. 6, p. 1-17, 2020.

RAHLF, J.; HAUGLIN, M.; ASTRUP, R.; BREIDENBACH, J. Timber volume estimation based on airborne laser scanning: comparing the use of national forest inventory and forest management inventory data. **Annals of Forest Science**, v. 78, n. 13, p. 1-17, 2021.

Manual GreenValley International LiGrip O1 Lite.

ISBN 978-65-990392-6-3

BIOGRAFIA RESUMIDA DOS AUTORES

Autores	Biografia Resumida
Adriano Arrué Melo	Prof. Dr. DFS-CCR e PPGEA/UFSM, especialista em Engenharia Agrícola, Tecnologia de Aplicação de produtos químicos e biológicos, Entomologia
Airton dos Santos Alonço	Engenheiro Agrícola, Doutor em Engenharia Mecânica, Professor na Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Alan Cechinato Bressan	Graduando em Agronomia e bolsista na Embrapa Uva e Vinho, Vacaria-RS.
Alberto Eduardo Knies	Prof. Dr. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Cachoeira do Sul - RS, especialista em Engenharia Agrícola e Ciência do Solo
Alejandro David Chuquimia Quicaña	Eng. Agrônomo e doutorando em Ciência do Solo pela UFRGS
Alessandra Soares Sessi	Agrônoma, bolsista da EMBRAPA - Uva e Vinho
Alessandro Carvalho Miola	Prof. Dr. Col. Politécnico/UFSM, Engenheiro Florestal, Mestre em Geomática e Doutor em Engenharia Agrícola.
Alessandro Fernando Machado Franco	Instituto Federal do Rio Grande do Sul – Campus Vacaria
Alexandre Cordeiro Bueno	Mestrando do Programa de Pós-graduação em Agricultura de Precisão da Universidade Federal de Santa Maria
Alexandre Wahlbrinck Volz	Eng. Agrônomo formado pela UFSM-FW
Aline Lampert Dutra	Médica Veterinária, Técnica em Agropecuária, estudante dos cursos Técnico em Agricultura de Precisão e Tecnologia em Geoprocessamento
Álisson Pacheco Sperandei	Eng. Florestal, mestrando no PPGEF-UFSM, especialidade em manejo florestal
Amanda Avozani	Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental na Texas Tech University (EUA), Mestre em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM
Amanda Fornari	Produtora rural, acadêmica de Eng. Agronômica UFSM-FW, membro LAPSul e integrante da AGR Jr. Consultoria Agronômica
Amanda Trentin Moro	Acadêmica de Eng. Agronômica UFSM-FW, membro LAPSul e integrante da AGR Jr. Consultoria Agronômica
Ana Carolina Machado Rodrigues	Estudante do curso Técnico em Meio Ambiente, bolsista do Projeto Advanced Farm 360 - Colégio Politécnico/UFSM
Ana Júlia Teixeira Soares	Acadêmica da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Ana Lívia dos Santos Ribeiro	Estudante do curso técnico em Agropecuária, bolsista do laboratório de Bovinocultura de Corte - Colégio Politécnico/UFSM
Ana Luíza Canto da Silva	Estudante do Curso de Engenharia Agrícola da UFSM Cachoeira do Sul/RS
Ana Luiza Souza Mesquita	Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) - Cachoeira do Sul/RS
Ana Paula Maccari	Doutora em Ciência do Solo, Pesquisa e Desenvolvimento AG Croppers
Anderson de Toledo	Eng. Agrícola, Pesquisador da Área de Engenharia Agrícola e Tecnologias Digitais do IDR-Paraná
André Felipe De Conti	Engenheiro Agrônomo, Mestrando em Agronomia PPGAAA/UFSM, membro LAPSul
André Luís Vian	Prof. Dr.do Departamento de Plantas de Lavoura UFRGS
André Müllich	Engenheiro Agrônomo, mestrando em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM
Andrei Pezzini Holdefer	Estudante de Agronomia, bolsista do projeto Advanced Farm 360, UFSM - Santa Maria/RS
Anelisa Pedroso Finger	Engenheira Florestal, Doutora em Manejo Florestal
Anna Elisa Gatelli	Graduanda em Agronomia pela UFRGS

Autores	Biografia Resumida
Antonio Luiz Martins Gutheli	Engenheiro Agrônomo, Tech Sales Rep Specialist na empresa Bayer Crop Science
Antonio Luís Santi	Prof. Dr. PPGAAA e PPGAP/UFSM, Eng. Agrônomo, Coordenador do LAPSul, Bolsista de Produtividade CNPq - PQ2
Artur Cidade dos Santos	Graduação em Processos Gerenciais, Mestrando em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM
Bárbara da Silva Nogueira	Acadêmica da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Beatriz Mariana	Estudante do Curso de Engenharia Agrícola da UFSM Cachoeira do Sul/RS
Brenda Giovanna Binotto Brandt	Produtora rural, acadêmica do 8º semestre de Agronomia UFSM-FW e membro do LAPSul
Bruna Rathke	Engenheira Agrônoma, Mestre em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM,
Bruna Trevizan Paese	Eng. Agrônoma, Mestre, Doutoranda do PPGCS-UFSM
Bruno Gabriel Mayerhofer	Estudante do Curso de Engenharia Agrícola da UFSM Cachoeira do Sul/RS
Bruno Henrique Rodrigues Sangiovo	Técnico em Agropecuária - Colégio Agrícola de Frederico Westphalen, Eng. Agrônomo UFSM
Caetana Nemitz	Graduanda em Agronomia, UFSM
Camilla da Silva Rodrigues	Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) - Cachoeira do Sul/RS
Carlos Alberto Rigo Junior	Mestrando em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM, Faz. Irmãos Rigo
Carlos Eduardo da Silva	Estudante do curso de Engenheira Agrícola da UFSM-CS.
Catia Bertollo Chaves	Eng. Agrônoma e mestranda em Ciência do Solo pela UFRGS
Charleston dos Santos Lima	Eng. Agrônomo, Doutor em Fitotecnica, Research Associate - Bayer Petrolina
Christian Bredemeier	Prof. Dr. PPGFITO/UFRGS; PPGAP/UFSM, Presidente da Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão e Digital/MAPA e Segundo Vice-presidente da ABraAP
Ciro Giusti Galiano	Tecnólogo em Geoprocessamento, técnico na empresa GPCAD - Engenharia e Topografia e Galiano Topografia
Cláudia das Neves Costa	Profa. Dra. Col. politênico/UFSM, Engenheira Agrônoma, especialista em Ciência do Solo
Claudir José Basso	Prof. Dr. DCAA-UFSM/FW e PPGAAA/UFSM, especialista em resíduos orgânicos; tecnologias e relação com ambiente no sistema de produção vegetal
Cristiano Carvalho da Silva	Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria
Daiane Luisa Rosso	Eng. Agrônoma, mestranda em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM, Promotora Técnica Digital - Climate Fieldview
Daniela Priori Pereira	Doutora em Melhoramento Genético, Docente do curso de Engenharia Agronômica - Cesurg Sarandi/RS
Danilo da Costa Soares	Eng. Agrônomo, Mestre em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM, técnico na Campo Verde Serviços de Agronomia e Assistência Técnica e Gerencial SENAR/RS
Denis Santos da Silveira	Eng. Agrônomo, especialista em fitotecnia
Diego Alessio	Engenheiro Agrônomo, Mestre, Sócio proprietário da Fazenda Banhado Verde, Faxinal dos Guedes/SC
Diego Armando Amaro da Silva	Prof. Dr. IFPR - Assis Chateaubriand/PR, doutor em Manejo e Conservação do Solo e da Água
Diego Duarte da Silveira	Engenheiro Agrônomo, Coordenador estratégico de vendas da VALTRA
Diego Zeni	Prof. Dr. Colégio Politécnico UFSM, especialista em zootecnia, produção animal, nutrição de ruminantes
Dienifer Weirich Lopes	Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) - Cachoeira do Sul/RS

ISBN 978-65-990392-6-3

Autores	Biografia Resumida
Edivan José Possamai	Eng. Agrônomo, Coordenador Estadual do Programa Grãos do IDR-Paraná.
Eduardo Antônio Speranza	Analista da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Doutor em Ciência da Computação
Eduardo Carvalho da Silva	Bolsista da EMBRAPA - Uva e Vinho
Eduardo Leonel Bottega	Prof. Dr. Campus UFSM-CS e PPGAP/UFSM, especialista em Engenharia Agrícola, agricultura de precisão, condutividade elétrica
Eliége Lampert	Estudante do 4º semestre de Eng. Agronômica - Cesurg Sarandi/RS
Emanoel Rolim Farias da Silva	Estudante de Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria
Emanuel Araújo Silval	Prof. Dr. PPGAAA/UFSM, Depto. Eng. Florestal UFSM-FW, especialista em sensoriamento Remoto e inteligência artificial
Emanueli Ludwig Michelin	Acadêmica do Curso de Agronomia (UNISC)
Endiele Lopes dos Santos	Eng. Agrícola, Projetista na empresa Horbach Silos e Secadores
Érika Batista Feron	Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) - Cachoeira do Sul/RS
Érika Nunes Macedo	Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) - Cachoeira do Sul/RS
Ezequiel Gasparin	Prof. Dr. DCF-CCR/UFSM e PPGEF/UFSM, especialista em sementes, propagação e melhoramento genético de espécies florestais
Ezequiel Zibetti Fornari	Engenheiro Agrônomo - UFSM FW
Fábio Marcelo Breunig	Prof. Dr. UFPR - Curitiba/PR, especialista em geoprocessamento e sensoriamento remoto
Fabio Rossi Cavalcanti	Eng. Agrônomo, Doutor em Agronomia, pesquisador na EMBRAPA Uva e Vinho, especialista em fisiologia
Fabrício de Araújo Pedron	Prof. Dr. DS-CCR/UFSM e PPGCS/UFSM, especialista em pedologia/pedometria, mapeamento digital de solos
Felipe Cherobini	Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) - Cachoeira do Sul/RS
Felipe Guadagnini Leite	Tecnólogo em Geoprocessamento e Mestre em Engenharia Agrícola UFSM, Fundador da SkySurvey
Fernanda Facco Cechin	Estudante de Agronomia, bolsista do projeto Advanced Farm 360, UFSM - Santa Maria/RS
Fernando Coelho Eugenio	Prof. Dr. PPGPV/UFVJM, especialista em algoritmos de aprendizagem profunda e imagens de altíssima resolução espacial obtidas por RPAS
Fernando Scaramuzza	Consultor privado em Agricultura de Precisão e Mecanização Agrícola na Argentina. Foi pesquisador do INTA - Manfredi por mais de 20 anos
Flaiane Catarine da Rosa	Engenheira Florestal, tem experiência em fisiologia vegetal
Franciele da Silveira Gomes	Técnica da Mensura Serviços Florestais - prestadora de serviços para a empresa CMPC Brasil
Francisco Gerhardt Magro	Doutor em Engenharia Civil e Ambiental, Prof. nos cursos de Engenharia Civil e Agronomia no CESURG/Sarandi-RS
Franco Freitas Quevedo	Engenheiro Florestal, Mestre em Fisiologia Vegetal, Gerente de Pesquisa Florestal na empresa CMPC Brasil
Frederico Ravazi de Castro	Mestrando em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM, fundador da empresa Fred Ravazi Soluções Tecnológicas
Gabriel Isaque Kampff	Engenheiro Agrônomo, Consultor Técnico da Cotrisal
Gabriel Kaefer Seganfredo	Graduando em Agronomia, UFSM
Gabriel Mateus Maggioni	Representante da empresa de drones de pulverização Texag Sul
Gabriel Mergen Rohrs	Acadêmico de Engenharia Agrícola na UFSM-CS

Autores	Biografia Resumida
Gabriel Paes Marangon	Prof. Dr. UNPAMPA - São Gabriel, especialista em manejo florestal, mapeamentos com vants e aprendizado de máquina
Gabriel Sasseti Klein	Zootecnista, UDESC-Chapecó/SC
Gabriel Thiel Prevedello	Acadêmico no curso de Agronomia na UFSM-FW, membro do LAPSul
Gabrielle Bortolotti	Graduanda em Agronomia, UFSM
Gerson dos Santos Lisboa	Prof. Dr. UFSB, especialista em manejo florestal, sensoriamento remoto e modelagem e simulação florestal
Gessieli Possebom	Engenheira Florestal, Doutora em Engenharia Agrícola, Técnica na empresa GPCAD, tem experiencia em levantamentos e processamento de dados espaciais
Getúlio Coutinho Figueiredo	Dr. Ciência do Solo e Professor Adjunto da UFRGS
Gianlucca Pigatto	Engenheiro Agrícola, mestrando em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM, Consultor na Farming Solutions DJI
Gilvan Moisés Bertollo	Prof. Dr. PPGAAA UFSM FW e PPGTCA - UTFPR, especialista em máquinas, mecanização e tecnologia agrícola, agricultura de precisão
Giovani Zabot	Prof. Dr. Universidade Federal de Santa Maria Campus Cachoeira do Sul - RS, especialista em Engenharia de Alimentos
Guilherme Bortolotto da Silva	Estudante de Agronomia, bolsista do projeto Advanced Farm 360, UFSM - Santa Maria/RS
Guilherme Coelho de Pellegrini	Eng. Ambiental, Técnico em Geomática, Supervisor Técnico Gpcad Engenharia e Topografia
Guilherme Natalli Farias	Acadêmico do curso de Agronomia UFSM-FW
Guilherme Rechden Lobato	Administrador de Empresas, Mestre em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM
Guilherme Scapin Muniz	Estudante de Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria
Guilherme Weber Bourscheid	Eng. Agrônomo, Mestre em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM
Gustavo Bock Bernhard	Acadêmico do curso de Engenharia Agrícola da UFSM-CS
Gustavo Brunetto	Prof. Dr. DS-CCR/UFSM e PPGCS/UFSM, especialista química e fertilidade do solo, adubação, calagem e nutrição de plantas
Gustavo Vedooto Ferreira	Engenheiro Florestal, Mestrando no PPGEF/UFSM; Técnico da GPCAD
Hendrick da Costa de Souza	Engenheiro Florestal e Agrônomo, Doutorando em Engenharia Florestal PPGEF/UFSM
Henrique Araujo Barichello	Engenheiro Florestal, doutorando em Engenharia Florestal PPGEF/UFSM
Henrique Onofre Cerbaro	Acadêmico de Agronomia UFSM-FW, membro LAPSul
Henrique Thomazi Bueno	Engenheiro Agrônomo - UFSM FW
Hevandro Colonhese Delalibera	Eng. Agrônomo, Pesquisador da Área de Engenharia Agrícola e Tecnologias Digitais do IDR-Paraná
Higor Juliano Pretto Dapper	Engenheiro Agrônomo pela UFSM-FW
Igor Cotica Gnoatto	Acadêmico de Eng. Agronômica UFSM-FW, membro LAPSul
Igor Drescher	Bolsista no Projeto Advanced Farm 360 UFSM
Igor G. L. M. V. de Souza	Prestador de serviço da See Tree Serviços Analíticos Brasil para a empresa CMPC Brasil
Igor Luis Muller	Engenheiro Agrônomo
Igor Madruga	Mestre em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM
Ingrid Lima	Gestora Ambiental, Mestre em Ambientometria, Mestranda em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM

Autores	Biografia Resumida
Ivan Carlos Maldaner	Prof. Dr. PPGAP/UFSM, Engenheiro Agrônomo, especialista em Agrometeorologia
Ivan Ricardo Carvalho	Professor Dr. URI, Programa de Pós-Graduação em Sistemas Ambientais e Sustentabilidade, cursos de Agronomia e Medicina Veterinária
Jaime Miguel Weber	Eng. Agrônomo, Prof. Dr. do Curso de Agronomia (UNISC)
Jaqueline Sgarbossa	Profa. Dra. PPGAP/UFSM, Engenheira Agrônoma, especialista em Fitotecnia
Jardel Talamini de Abreu	Mestre em Agricultura de Precisão PPGAP-UFSM, sócio fundador da empresa Agriexata Consultoria em Agricultura de Precisão
Jean Michel Moura Bueno	Prof. Dr. UNICRUZ, DCS-CCR/UFSM e PPGCS/UFSM, integrante GEPACES e GEPED, especialista em pedometria, sensoriamento proximal de solos, mapeamento digital de solos
João Batista Cassol Ferreira	Engenheiro Florestal, graduando em Tecnologia em Geoprocessamento, técnico da Prefeitura Municipal de Santa Maria-RS
João Batista da Silva Santos	Engenheiro Agrícola, Mestrando em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM
João Gabriel Fortes Peixoto	Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) - Cachoeira do Sul/RS
João Leonardo Fernandes Pires	Pesquisador na Embrapa Trigo
João Miguel Taufer Alves	Estudante do 8º semestre de Eng. Agronômica - Cesurg Sarandi/RS
João Vittor Haefliger Camargo	Estudante de Agronomia UFSM-FW, membro LAPSul, Vice-presidente da Comissão Jovem da FARSUL-FW
Jocélia Rosa da Silva	Eng. Agrônoma, Doutora em Agronomia, é analista de dados agronômicos na empresa Irriga Global
José Alexandre Bredow	Engenheiro Agrícola, Mestrando em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM
José Carlos Caetano Reis	Agrônomo, Analista de Marketing de Produtos, pesquisa e desenvolvimento de produtos na empresa J.ASSY
José Luiz Balansin Finatto	Engenheiro Agrônomo, mestrando PPGAAA/UFSM, membro GPMP
Jovania Menezes Dias	Instituto Federal do Rio Grande do Sul – Campus Vacaria
Juhan Vitor A. Pedon	Acadêmico do curso de Engenharia Agronômica - Cesurg Sarandi/RS
Juliano Arthur Drescher	Estudante do Curso de Engenharia Agrícola da UFSM Cachoeira do Sul/RS
Juliano Dalcin Martins	Prof. Dr. DER-CCR/UFSM e PPGAP/UFSM, especialista em engenharia agrícola e solos, manejo da água em sistemas agrícolas, irrigação
Julio Gustavo Buchholz	Estudante de Agronomia UFSM-FW, membro LAPSul
Junior Sandri	Técnico do Grupo Don Mario (GDM)
Laína Vitória Grasseli	Estudante do 4º semestre de Eng. Agronômica - Cesurg Sarandi/RS
Larissa Meira	Eng. Agrônoma, Mestranda em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM
Laura Beatriz Schott	Estudante de Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria
Laura da Silva Camargo	Estudante de Agronomia UFSM, bolsista do projeto Advanced Farm 360
Leonardo Rodrigues Barbosa	Pesquisador Dr. EMBRAPA - Florestas, Doutor em Agronomia, especialidade em entomologia, controle biológico e manejo integrado de pragas florestais
Leticia Bertote Belarmino	Estudante de Agronomia, bolsista do projeto Advanced Farm 360, UFSM - Santa Maria/RS
Lillian Espindola Müller	Doutoranda do PPG em Fitotecnia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Lorenzo Isasmendi da Silveira	Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) - Cachoeira do Sul/RS

Autores	Biografia Resumida
Luan Pierre Pott	Eng. Agrônomo, Doutor, Técnico do Grupo Don Mario (GDM)
Luana Lüdtke	Graduanda em Agronomia, UFSM
Lucas Cagliari Grando	Mestrando em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM, TELUS Agriculture & Consumer Goods
Lucas de Ross Marchioretto	Agrônomo, Doutor em Fitotecnia, bolsista da EMBRAPA - Uva e Vinho
Lucas Steffanello	Estudante de Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria
Luciano Gebler	Pesquisador da EMBRAPA - Uva e Vinho, Prof. Dr. PPGAP/UFSM, especialista em Agricultura de Precisão/Fruticultura de Precisão
Luciano Zucuni Pes	Prof. Dr. PPGAP/UFSM, Engenheiro Agrônomo, especialista em Ciência do Solo
Lucindo Somavilla	Eng. Agrônomo, Mestre em Agronomia, servidor TAE na UFSM-FW
Lúcio de Paula Amaral	Prof. Dr. DER-CCR; PPGAP e PPGEF/UFSM, Eng. Florestal, especialista em geoprocessamento, agricultura e floresta de precisão.
Luís Felipe Albarello	Estudante Graduação de Agronomia UFSM
Luís Felipe Rech	Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria
Luís Felipe Rossetto Gerlach	Doutorando em Fitotecnia UFRGS, Mestre em Agricultura de Precisão UFSM
Luis Gustavo Kern	Tecnólogo em Geoprocessamento UFSM. Bolsista INPE.
Luis Paulo Baldissera Shorr	Engenheiro Florestal, Mestre, Professor do curso de Eng. Agronômica - Cesurg Sarandi/RS
Luísa Ceresoli Chimello	Graduanda em Agronomia pela UFRGS
Luise Jardim Pedó	Advogada especialista em Agronegócios, Mestranda em Agricultura de Precisão
Luiz Felipe Silveira Pavão	Engenheiro Agrônomo, mestrando em Engenharia Agrícola PPGEA/UFSM
Luiz Henrique Baptista Velho	Engenheiro Agrônomo
Luiz Patric Kayser	Prof. Dr. PPGAP/UFSM; Arquivologista e Cientista de Dados, especialista em geotecnologias, Eng. Agrícola e inteligência artificial
Maicon William Holzschuh	Acadêmico do Curso de Engenharia Agrícola (UNISC)
Maísa Jungbeck	Acadêmica em Agronomia - UNICRUZ, assistente de pesquisa da empresa Next-Agrociência
Marcelo Luis Seibert	Eng. Agrônomo, Mestrando na Agricultura e Ambiente PPGAAA/UFSM
Marcelo Silveira de Farias	Prof. Dr. PPGAP e PPGEA/UFSM, Engenheiro Agrônomo, especialista em Máquinas Agrícolas
Marcelo Suk	Técnico do Grupo Don Mario (GDM)
Márcio Andrei Fusiger	Representante da empresa de drones de pulverização Texag Sul
Márcio Gabriel Mötke Wrubleski	Graduando em Agronomia pela UFRGS
Marco Antonio Kramm	Graduando em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria, UFSM-FW
Marco Ivan Rodrigues Sampaio	Prof. Dr. UNICRUZ e URI, Mestre em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM, Doutor em Geografia UFSM, sócio fundador da empresa Agrourbis.
Marconi Ribeiro Furtado Junior	Prof. Dr. Departamento de Engenharia Agrícola UFV, Viçosa/MG, especialista em Mecanização Agrícola, Projeto de Máquinas Agrícolas
Marcos Paulo Pereira Ribeiro	Estudante de Agronomia, bolsista do projeto Advanced Farm 360, UFSM - Santa Maria/RS
Marcus Vinícius Tres	Prof. Dr. Universidade Federal de Santa Maria Campus Cachoeira do Sul - RS, especialista em Engenharia de Alimentos
Maria Fernanda Kunz Stangarlin	Técnica da empresa GPCAD Engenharia e Topografia

Autores	Biografia Resumida
Maria Isabel Borelli Teixeira	Graduanda em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria
María Silvia Pardi Lacruz	Profa. Dra. PPGAP/UFSM, especialista em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento
Mariana Rockenbach de Ávila	Profa. Dra. UNIPAMPA - Dom Pedrito/RS, especialista em zootecnia, fisiologia vegetal e melhoramento genético de plantas
Mariany Domingues	Técnica do Grupo Don Mario (GDM)
Mateus Junior Rodrigues Sangiovo	Eng. Agrônomo, mestrando PPGAAA/UFSM
Mateus Santos Ribeiro	Mestrando do Programa de Pós-graduação em Agricultura de Precisão da Universidade Federal de Santa Maria
Matheus Gnoatto	Acadêmico do Curso de Engenharia Agronômica do Cesurg Sarandi/RS
Matheus Monteiro Valero	Eng. Agrônomo, Coordenador de Agricultura Digital na Agrícola Zanella, especialização em agricultura de Precisão e MBA em Agricultura Digital e Inteligência Competitiva
Matheus Piovezan	Engenheiro Ambiental, mestrando no PPGAAA/UFSM
Mathias Sasseti Klein	Engenheiro Agrônomo, mestrando PPGAAA/UFSM; pós-graduando em Sistemas de Produção Vegetal - IFRS - Sertão
Maurício Guilherme Stein Vian	Acadêmico de Agronomia UFSM-FW, Produtor Rural, LAPSul
Maximiliano Sabino	Técnico do Grupo Don Mario (GDM)
Messias Carneiro Soares	Graduando em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria, UFSM-FW
Michael Mazurana	Engenheiro Agrônomo, Dr. Ciência do Solo e Professor Adjunto da UFRGS e diretor da EEA.
Micheli Reis da Rocha	Engenheira Florestal, mestranda em Engenharia Florestal PPGEF/UFSM
Milena Ferreira da Silva Zühl	Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) - Cachoeira do Sul/RS
Mirta Teresinha Petry	Profa. Dra. DER-CCR/UFSM e PPGEA/UFSM, especialista em irrigação e manejo da água em sistemas agrícolas
Mônica Noal Santarém	Engenheira Agrônoma, técnica Agricultura de Precisão, Consultora Digital na SLC Máquinas
Murillo Rodrigues Dias	Estudante de Agronomia, bolsista do projeto Advanced Farm 360, UFSM - Santa Maria/RS
Murilo Santi Trentin	Estudante do curso de Engenharia Agronômica na UFSM-FW, membro do LAPSul, produtor rural
Nádia Mariane Mucha	Pós-doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria
Natália de Souza Nunes	Eng. Agrônoma, MBA em Gestão de Projetos, pós-graduanda especialização em agricultura de precisão PUC/PR, Analista Sênior de Sucesso do Cliente na Solinftec
Natalia Lopes	Acadêmica do Curso de Agronomia (UNISC)
Nícolas Panciera Cabral	Estudante Graduação de Agronomia UFSM
Nicole Bonini	Acadêmica de Eng. Agronômica na UFSM - FW, membro LAPSul
Noeme da Costa Santos	Engenheira Florestal, mestranda no PPGCS/UFSM
Norton Borges Junior	Eng. Florestal, Mestre, Doutorando no PPGEF/UFSM; CMPC Brasil - pesquisador Proteção/Fitossanidade
Núbia Pentiado Aires	Eng. Agrônoma, Mestre em Agricultura de Precisão, pesquisadora e especialista em irrigação na empresa Irriga Global
Paulo Eugenio Baccin	Mestrando do Programa de Pós-graduação em Agricultura de Precisão da Universidade Federal de Santa Maria
Pedro Eduardo Fischer Boeno	Estudante do curso de Engenheira Agrícola da UFSM-CS.

ISBN 978-65-990392-6-3

Autores	Biografia Resumida
Pedro Lopes Trevisan	Eng. Florestal, mestrando em Engenharia Florestal PPGEF/UFSM
Priscila Pacheco Mariani	Eng. Ambiental, profa. Dra. do Curso de Agronomia (UNISC)
Rafael Augusto Karsburg	Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) - Cachoeira do Sul/RS
Rafael Röhrs Borges	Estudante do Curso de Engenharia Agrícola da UFSM Cachoeira do Sul/RS
Rafael Sobroza Becker	Engenheiro Agrônomo, Doutor em Engenharia Agrícola, Professor na Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC
Rafaela Fauth Bisol	Estudante do Curso de Engenharia Agrícola da UFSM Cachoeira do Sul/RS
Rafaela Richardt Piazza	Estudante do Curso de Engenharia Agrícola da UFSM Cachoeira do Sul/RS
Raí Schwalbert	Eng. Agrônomo, Doutor, Técnico do Grupo Don Mario (GDM)
Raissa Wolffenbüttel	Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) - Cachoeira do Sul/RS
Regiane Aparecida Ferreira	Engenheira Florestal, Mestre em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM
Régis Ruoso	Engenheiro Agrícola, Mestrando em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM
Renan da Rosa	Eng. Agrônomo, mestrando em Agronomia Agricultura e Ambiente PPGAAA-UFSM, membro LAPSul
Renan Mariotti	Graduação em Agronomia UFSM-FW.
Reyel Kiefer Unfer	Estudante do Curso de Engenharia Agrícola da UFSM Cachoeira do Sul
Reyllis Kiefer Unfer	Eng. Agrônomo, Mestre em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM, Consultor Técnico na empresa ConnectFARM
Ricardo Simão Diniz Dalmolin	Prof. Dr. DS-CCR/UFSM, PPGCS/UFSM, especialista em Gênese, morfologia, classificação e mapeamento digital de solos
Richard Massirer Prochnow	Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) - Cachoeira do Sul/RS
Roberta Aparecida Fantinel	Engenheira Florestal, Pós-doutoranda em Ciências Florestais PPGCF/UFES
Robson Giacomeli	Doutor em Engenharia Agrícola, TAE Depto Fitotecnia - CCR UFSM, Eng. Agrônomo da Área Didática Experimental de Várzea
Rodrigo Buffon	Engenheiro Agrônomo, CEO – SPD Soil Diagnostic
Rodrigo Marcuzzo Motta	Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) - Cachoeira do Sul/RS
Rudiney Soares Pereira	Prof. Dr. DER-CCR/UFSM e PPGEF/UFSM, especialista em manejo florestal, sensoriamento remoto e inteligência artificial
Sabrina Tolotti Peruzzo	Eng. Agrônoma, doutora em Agronomia, Professora e coordenadora do curso de Eng. Agronômica - Cesurg Sarandi/RS
Sally Deborah Pereira da Silva	Engenheira Florestal, Mestre em Engenharia Florestal, Doutoranda no PPGEF/UFSM
Schayana Pavelski	Eng. Agrônoma, doutora em Agronomia, Agricultura e Ambiente, coordenadora do curso de Agronomia UNOPAR-FW/RS, proprietária da empresa Floresça Viveiro
Silmar Mateus Dallabrida	Tecnólogo em Processos Gerenciais, Eng. Agronômo e Sócio proprietário da empresa de Agricultura de Precisão Agroterra LTDA.
Silvio Andre Meirelles Alves	Eng. Agrônomo, Doutor em Agronomia, Pesquisador da EMBRAPA - Uva e Vinho, especialista em fitopatologia
Stela Maris Kulczynski	Eng. Agrônoma, doutora em Fitotecnia pela UFRGS
Taís Gonçalves Pinto	Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) - Cachoeira do Sul/RS
Tarik Cuchi	Doutor em Engenharia Florestal, Bolsista FAPESC na EPAGRI/CEPA
Telmo Jorge Carneiro Amado	Prof. Dr. PPGAP/UFSM; Eng. Agrônomo, especialista em Manejo de Solo, Nitrogênio e Agricultura de Precisão
Teodora Lütkemeyer	Sindicato Rural de Não-Me-Toque/RS, Produtora Rural, Presidente do APSUL AMÉRICA
Teresa Enderle	Graduanda em Agronomia pela UFRGS

ISBN 978-65-990392-6-3

Autores	Biografia Resumida
Thaís Camila Griebler	Acadêmica de Eng. Agronômica na UFSM - FW, LAPSul e PET Ciências Agrárias
Thales Augusto Ulrich	Engenheiro Florestal, técnico na empresa GPCAD Engenharia e Topografia
Thauhana Cássia Gasparotto Kuhn	Graduanda em Agronomia pela UFRGS
Thiago Santos Cocco	Graduando em Agronomia pela UFRGS
Tiago Rodrigo Francetto	Engenheiro Agrícola, Doutor em Engenharia Agrícola, Professor na Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Vagner dos Santos Machado	Técnico da empresa Mensura Serviços Florestais - prestador de serviços em Fitossanidade na CMPC Brasil
Vanessa Bayer da Rosa	Médica Veterinária, Doutora em Zootecnia, Projeto Adavnced Farm UFSM
Vanessa Pereira de Freitas Silva	Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) - Cachoeira do Sul/RS
Victor Hugo Lezcano Velazco	Eng. Agrônomo, Mestrando em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM, atua na empresa Sustentap Agricultura de Precisión em Hohenau, Paraguai
Vinicius Kaster Marini	Prof. Ph.D. Depto. de Eng. Mecânica - CT/UFSM, PPGAP/UFSM, especialista em projeto informacional de máquinas agrícolas
Vinicius Ritcher	Mestre em Engenharia Florestal PPGEF/UFSM, acadêmico de Ciência dos dados IFAR
Vitor Cargnin Pegoraro	Estudante de Agronomia, bolsista do projeto Advanced Farm 360, UFSM - Santa Maria/RS
Vitor Eduardo Schardong	Estudante de Agronomia UFSM-FW, membro LAPSul
Vitor Hugo Agarriberri Dittberner	Engenheiro Agrônomo, egresso Uergs - Cachoeira do Sul/RS
Wagner Nart Macedo	Economista, Tecnólogo em Gestão Financeira, Mestrando em Agricultura de Precisão PPGAP/UFSM, Sócio da AGROGERENCIAL
Wellington da Silva	Estudante do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs) - Cachoeira do Sul/RS
Weslei Graffunder	Técnico do Grupo Don Mario (GDM)
Willian José Junges	Estudante de Agronomia UFSM-FW, membro LAPSul
Zanandra Boff de Oliveira	Profa. Dra. UFSM-CS, PPGAP/UFSM, especialista em Engenharia Agrícola e Ciência do Solo

7º APSul AMÉRICA
Congresso Sul-Americano de Agricultura de Precisão e Máquinas Precisas

Organização

Patrocínio Diamante

Patrocínio Ouro

Patrocínio Prata

Patrocínio Bronze

Apoiadores

EDITORA CESPOL/UFSM
ISBN nº 978-65-990392-6-3