

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AGRÍCOLA**

Enrico Fleck Tura

**Explicando a contribuição do número de aplicações de fungicidas
foliares na produtividade de lavouras de soja**

Dissertação de Mestrado

Santa Maria, RS

2023

Enrico Fleck Tura

**Explicando a contribuição do número de aplicações de fungicidas
foliares na produtividade de lavouras de soja**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração de Água e Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Dr. Alencar Junior Zanon

Santa Maria, RS

2023

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Tura, Enrico Fleck

Explicando a contribuição do número de aplicações de fungicidas foliares na produtividade de lavouras de soja / Enrico Fleck Tura.- 2023.

37 p.; 30 cm

Orientador: Alencar Junior Zanon

Coorientador: Nereu Augusto Streck

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2023

1. Fungicidas em soja 2. Manejo de lavouras de soja
I. Zanon, Alencar Junior II. Streck, Nereu Augusto III.
Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, ENRICO FLECK TURA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Enrico Fleck Tura

**Explicando a contribuição do número de aplicações de fungicidas foliares
na produtividade de lavouras de soja**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola.**

Alencar Junior Zanon, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Daniel Debona, Dr. (UTFPR - Campus Santa Helena)

Octavio Pedro Caviglia, Dr. (UNER)

Santa Maria, RS

2023

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, Renaldo, Eliana, Lorenzo e Iguapor serem uma base sólida e que sempre me deram liberdade para escolher meus caminhos.

Ao professor Alencar Junior Zanon pela amizade, parceria, orientação e pelas oportunidades durante o mestrado. Por mostrar e acreditar nos resultados do “Hard Work” e pela verdadeira e incansável vontade de formar pessoas.

Ao Prof. Juliano Dalcin Martins pela orientação, amizade e por ser um dos meus grandes incentivadores durante a graduação.

Aos meus eternos supervisores Fernando Campos da Costa, Ramiro DalMolin Pombo e Tulio Eduardo de Seixas Peres por toda a amizade durante os anos que me acompanharam no estágio, me mostrando a importância das pessoas que passam pela nossa vida.

Aos colegas da Equipe FieldCrops, que me acolheram quando entrei no grupo, onde compartilhamos conhecimentos.

Aos amigos que surgiram ao longo deste mestrado em especial ao Eduardo Lago, Alexandre Ferigolo, José Eduardo Winck, Felipe Schmitd Dalla Porta, Lorenzo Dalcin Meus, Maurício Fornalski e Michel Rocha da Silva pelas incontáveis horas de conversa e discussões.

E por fim, não poderia esquecer todas as pessoas que vieram antes de nós e cujo trabalho e dedicação abriram as portas para as oportunidades que desfrutamos hoje.

EPÍGRAFE

“Moderação na defesa da verdade é serviço prestado à mentira.”

Olavo de Carvalho

RESUMO

Explicando a contribuição do número de aplicações de fungicidas foliares na produtividade de lavouras de soja

AUTOR: Enrico Fleck Tura

ORIENTADOR: Alencar Junior Zanon

O controle de doenças em soja no Brasil parte da lacuna de produtividade das lavouras (atualmente a lacuna de produtividade é de 2400 kg há⁻¹), também onera os custos de produção pela necessidade de aplicações de insumos (fungicidas foliares). Assim adequar o número de aplicações de fungicidas nas lavouras resulta em maiores produtividades e/ou menor custo de produção, aumentando a lucratividade da atividade. Portanto, compreender sua interação com outros fatores de manejo e ambiente é essencial para otimizar o uso de recursos e reduzir a perda de produtividade. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi relacionar o número de aplicações de fungicidas foliares com a produtividade das lavouras em função de fatores biofísicos e de manejo para quantificar a influência do manejo de fungicidas foliares em lavouras de soja no Sul do Brasil. Para isso, relacionamos o número de aplicações de fungicidas foliares com a produtividade das lavouras. Associamos o potencial de produtividade limitado por água com número de aplicações de fungicidas e a produtividade de lavouras, assim como estabelecemos uma relação entre o grupo de maturidade relativa das cultivares a produtividade e o número de aplicações de fungicidas foliares. Os resultados mostraram que o máximo retorno pela adoção de uma aplicação de fungicidas foi de 599,6 kg ha⁻¹. Lavouras que recebem um maior número (3-5) de aplicações de fungicidas tem probabilidade igual ou maior que 50 % de atingirem produtividades acima da média. O número ótimo de aplicações de fungicidas foliares foi influenciado pelo potencial limitado por água da lavoura em que lavouras com maior potencial de produtividade limitado por água e cultivares com GMR menor (<5,8) foram mais responsivas a um maior número de aplicações de fungicidas foliares. Concluiu-se que a máxima resposta a aplicação de fungicidas foliares é de 599,8 kg há⁻¹ para cada aplicação. Deve-se considerar o potencial de produtividade limitado por água para determinar o número de aplicações. Cultivares de ciclo precoce, necessitam de um maior número de aplicações de fungicidas foliares.

Palavras-chave: Manejo de doenças, potencial de produtividade, lacuna de produtividade.

ABSTRACT

Explaining the contribution of the number of foliar fungicides application to soybean fields yield

AUTHOR: Enrico Fleck Tura

ADVISOR: Alencar Junior Zanon

Disease control in soybeans in Brazil starts from the yield gap (currently the yield gap is 2400 kg ha⁻¹), it also increases production costs due to the need for input applications (foliar fungicides). Thus, adjusting the number of fungicide applications in fields will result in higher yields and/or lower production costs, which will increase the profitability of the intervention. Therefore, understanding the interaction with other management and environmental factors is critical to optimize resource use and reduce yield losses. In this sense, the objective of this work was to relate the number of foliar fungicide applications to field yield as a function of biophysical and management factors, in order to quantify the impact of foliar fungicide management on soybean crops in southern Brazil. To this end, we relate the number of foliar fungicide applications to field yield. We relate water-limited yield potential to the number of fungicide applications and field yield and establish a relationship between the relative maturity group of cultivars, productivity, and the number of foliar fungicide applications. The results show that the maximum yield for a fungicide application is 599.6 kg ha⁻¹. Crops that receive a greater number (3-5) of fungicide applications have a 50% or greater chance of producing above average yields. The optimal number of foliar fungicide applications was influenced by the water-limited potential of the crop, with fields with greater water-limited productivity potential and cultivars with a lower GMR (< 5.8) responding better to a greater number of fungicide applications foliar. It was found that the maximum response to foliar fungicide application is 599.8 kg ha⁻¹ for each application. Water-limited yield potential must be considered when determining the number of applications. Early-cycle varieties require a greater number of foliar fungicide applications.

Key words: Disease management, yield potential, yield gap.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Mapa do Brasil, destacando a região de estudo (Rio Grande do Sul). Os círculos pretos vazios representam a localização das 1163 lavouras avaliadas em seis safras (2016/2017, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022). A cor laranja representa a área de abrangências das *buffers zones* utilizadas. As estrelas azuis representam a localização das estações meteorológicas..... 17

FIGURA 2–Relação ente produtividade e número de aplicações de fungicidas em lavouras de soja. A linha preta é a função limite. A linha tracejada vermelha representa a regressão linear ($y=599,8x + 3357,4$) entre a produtividade e uma a 4,2 aplicações de fungicidas foliares. Dados de 1163 lavouras de 6 safras (2016/2017, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022)..... 19

FIGURA 3 - Análise de probabilidade de se atingir produtividades abaixo ou acima da média das lavouras ($3056,5 \text{ kg ha}^{-1}$) (linha cinza tracejada) em função do número de aplicações de fungicidas foliares. Dados de 1163 lavouras de 6 safras (2016/2017, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022). A cor de cada linha representa o número de aplicações de fungicidas foliares recebidas por cada lavoura, sendo: uma aplicação (vermelha), duas aplicações (preta), três aplicações (amarela), quatro aplicações (azul) e cinco aplicações (verde). 20

FIGURA 4 -Relação entre potencial produtivo limitado por água e produtividade obtida em cada lavoura em função do número de aplicações de fungicidas foliares. Dados de 841 lavouras de 6 safras (2016/2017, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022)..... 21

FIGURA 5 -Resposta de grupos de maturidade relativa ao número de aplicações de fungicidas foliares. Os pontos vermelhos são cultivares com GMR menor que 5,8. Os pontos azuis são cultivares com GMR entre 6,8 e 6,2. Os pontos amarelos são cultivares com GMR maior que 6,2. A linha tracejada vermelha representa a regressão linear para cultivares com GMR menor que 5,8, a linha tracejada azul para cultivares com GMR entre 5,8 e 6,2 e a linha tracejada amarela para cultivares com GMR maior que 6,2. Dados de 1132 lavouras de 6 safras (2016/2017, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022)..... 22

FIGURA 6 - Importância de cada variável para a produtividade em lavouras com lacuna de produtividade menor que 20%. PPA = Potencial de produtividade limitado por água. N° Fungicidas = Número de aplicações de fungicidas foliares. GMR = Grupo de Maturidade Relativa. Data de semeadura = Data de semeadura da lavoura. Resistência =

Tecnologia de resistência a ferrugem asiática da soja. K_2O = Quantidade aplicada de fertilizante fonte de potássio..... 25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de práticas de manejo e insumos aplicados entre os tercis de alta e baixas produtividades 1163 lavouras de soja no Rio Grande do Sul, Brasil. Os valores indicam as diferenças médias entre os tercis de rendimento superior e inferior. As médias são indicadas para cada variável no campo altas produtividades e baixas produtividades. Os asteriscos indicam significância em $p < 0,01^*$ 19

Sumário

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	12
2	ARTIGO: EXPLICANDO A CONTRIBUIÇÃO DA APLICAÇÃO DE FUNGICIDAS FOLIARES NA PRODUTIVIDADE DE LAVOURAS DE SOJA	13
2.1	RESUMO.....	13
2.2	INTRODUÇÃO.....	13
2.3	MATERIAL E MÉTODOS.....	16
2.3.1	Dados de lavouras e caracterização da região.....	16
2.3.2	Dados meteorológicos	17
2.3.3	Potencial produtivo e potencial produtivo limitado por água ..	17
2.3.4	Análise dos dados	18
2.4	RESULTADOS	18
2.5	DISCUSSÃO	23
2.6	CONCLUSÃO	27
2.7	AGRADECIMENTOS	27
2.8	REFERÊNCIAS.....	27
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1 INTRODUÇÃO GERAL

A soja (*Glycine max* L.) é a principal oleaginosa cultivada em nível global, sendo uma cultura agrícola fundamental na segurança alimentar mundial por ser utilizada como fonte de proteína e óleo para alimentação humana e animal (FAO, 2022). O Brasil ocupa a posição de maior produtor e exportador de soja do mundo, sendo responsável por gerar 40% da produção global (USDA, 2023), com uma área de plantio de 44,1 milhões de hectares (CONAB, 2023). Estima-se que o potencial de produtividade limitado por água nesta área semeada com soja no Brasil é de 5.500 kg ha⁻¹, com uma produtividade média nas últimas cinco safras é 3.355 kg ha⁻¹ e uma lacuna de produtividade de 2145 kg ha⁻¹ (MARIN *et al.*, 2022).

A produtividade de uma cultura pode ser é determinado pela relação dos fatores que definem o potencial de produtividade (CO₂, radiação solar, temperatura, genótipo) em relação à oferta dos fatores que limitam (água, nutrientes) e a eficiência em mitigar os fatores que reduzem o potencial de produtividade (RONG *et al.*, 2021). Para o Rio Grande do Sul, já foram estimados o potencial de produtividade, o potencial de produtividade por água e a lacuna de produtividade (TAGLIAPIETRA *et al.*, 2021). Além disso, foram apontados fatores que causam a lacuna de produtividade, incluindo época de semeadura, grupo de maturidade relativa da cultivar, fertilidade do solo, nutrição das plantas, densidade de plantas e manejo conservacionista do solo (WINCK *et al.*, 2023). O manejo de doenças também foi apontado como um dos fatores que separa lavouras de alta e baixas produtividades o que corrobora com TAGLIAPIETRA *et al.* (2021), que também utilizaram dados de lavouras para identificar os fatores que reduziram a produtividade de soja. SENTELHAS *et al.*, (2015) também identificou a falha no controle de doenças como uma das causas de lacuna de produtividade.

Existem esforços sendo realizados para investigar o controle de doenças em lavoura de soja. Estes trabalhos são realizados com foco no controle de doenças em situações de elevada severidade das doenças, existindo poucos trabalhos com a integração dos fatores de manejo em conjunto (MOREIRA *et al.*, 2015). Segundo AZEVEDO (2001), a implementação do manejo de doenças exige o conhecimento da interação dos componentes dos agroecossistemas. Uma alternativa para integrar vários fatores de manejo nas análises consiste em utilizar dados de lavouras de produtores (ANDRADE *et al.*, 2022).

Dados de manejo de 1163 lavouras foram coletados durante 6 safras (2016/2017 até 2021/2022) com objetivo de quantificar a influência do número de aplicações de fungicidas sobre a produtividade em diferentes ambientes de produção de soja no Rio Grande do Sul, Brasil.

2 ARTIGO: EXPLICANDO A CONTRIBUIÇÃO DA APLICAÇÃO DE FUNGICIDAS FOLIARES NA PRODUTIVIDADE DE LAVOURAS DE SOJA

Explicando a contribuição da aplicação de fungicidas foliares na produtividade de lavouras de soja

Enrico Fleck Tura¹, Michel Rocha da Silva², José Eduardo Minussi Winck², Alexandre Ferigolo Alves¹, Mauricio Fornalski Soares¹, Daniel Debona³, Nereu Augusto Streck¹, Alencar Junior Zanon¹.

O artigo será submetido a: Scientific Reports.

¹Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima 1000, Hall 77, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

² Crops Team – Consultoria, Pesquisa e Desenvolvimento, Roraima, Avenida 1000, Pavilhão 61H, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

³ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Santa Helena, Prolongamento da Rua Cerejeira, São Luiz, 85892000 - Santa Helena, PR – Brasil.

2.1 RESUMO

O controle de doenças em soja no Brasil parte da lacuna de produtividade das lavouras (atualmente a lacuna de produtividade é de 2400 kg há⁻¹), também onera os custos de produção pela necessidade de aplicações de insumos (fungicidas foliares). Assim adequar o número de aplicações de fungicidas nas lavouras resulta em maiores produtividades e/ou menor custo de produção, aumentando a lucratividade da atividade. Portanto, compreender sua interação com outros fatores de manejo e ambiente é essencial para otimizar o uso de recursos e reduzir a perda de produtividade. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi relacionar o número de aplicações de fungicidas foliares com a produtividade das lavouras em função de fatores biofísicos e de manejo para quantificar a influência do manejo de fungicidas foliares em lavouras de soja no Sul do Brasil. Para isso, relacionamos o número de aplicações de fungicidas foliares com a produtividade das lavouras. Associamos o potencial de produtividade limitado por água com número de

aplicações de fungicidas e a produtividade de lavouras, assim como estabelecemos uma relação entre o grupo de maturidade relativa das cultivares a produtividade e o número de aplicações de fungicidas foliares. Os resultados mostraram que o máximo retorno pela adoção de uma aplicação de fungicidas foi de 599,6 kg ha⁻¹. Lavouras que recebem um maior número (3-5) de aplicações de fungicidas tem probabilidade igual ou maior que 50 % de atingirem produtividades acima da média. O número ótimo de aplicações de fungicidas foliares foi influenciado pelo potencial limitado por água da lavoura em que lavouras com maior potencial de produtividade limitado por água e cultivares com GMR menor (<5,8) foram mais responsivas a um maior número de aplicações de fungicidas foliares. Concluiu-se que a máxima resposta a aplicação de fungicidas foliares é de 599,8 kg há⁻¹ para cada aplicação. Deve-se considerar o potencial de produtividade limitado por água para determinar o número de aplicações. Cultivares de ciclo precoce, necessitam de um maior número de aplicações de fungicidas foliares.

Palavras-chave: Manejo de doenças, potencial de produtividade, lacuna de produtividade.

2.2 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor e exportador de soja do mundo, sendo responsável por produzir 40 % da produção mundial (USDA, 2023), com uma área semeada de 44,1 milhões de hectares (CONAB, 2023). Entre os três maiores produtores mundiais, o Brasil apresenta o maior potencial de produtividade limitado por água (5.500kg ha⁻¹), comparado com 4.900kg ha⁻¹ e 3.900kg ha⁻¹ dos Estados Unidos e Argentina, respectivamente (GYGA, 2023). Além disso, o Brasil apresenta a maior oportunidade de aumentar a produção de soja na atual área agricultável, através da adoção de boas práticas de manejo, pois a lacuna de produtividade é de 2.400kg ha⁻¹, enquanto na Argentina são 1.300kg ha⁻¹ e nos Estados Unidos 1.700kg ha⁻¹ (ARAMBURU MERLOS *et al.*, 2015; GRASSINI *et al.*, 2015; MARIN *et al.*, 2022). A redução da lacuna de produtividade de 45% para 20% permitiria aumentar a produção de soja brasileira em 7,5 milhões de toneladas. Um aumento de 4,8 % na produção nacional o que seria equivalente a 2,4 M ha (MARIN *et al.*, 2022). Porém, para reduzir a lacuna de produtividade é necessário identificar quais são os fatores que causam perdas de produtividade nas lavouras de soja (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; VAN ITTERSUM *et al.*, 2013).

Estudos para identificar fatores que limitam a produtividade utilizando como base dados de lavouras tem sido realizados ao redor do mundo, por exemplo, com arroz na China (YUAN *et al.*, 2021), milho nos Estados Unidos (GRASSINI *et al.*, 2011), arroz e milho na Indonésia (RIZZO *et al.*, 2023). Em soja, os fatores de manejo que causam a lacuna de produtividade já foram determinados no *corn belt* americano, e o controle de doenças aparece como o segundo fator que mais causa redução na produtividade (GRASSINI *et al.*, 2015; MOURTZINIS *et al.*, 2018; SHAH *et al.*, 2021). Na Argentina, a aplicação de fungicidas aparece como o principal fator que causa lacuna de produtividade em lavouras de soja de segunda safra (semeadas após o cultivo de trigo) (DI MAURO *et al.*, 2018). No Sul do Brasil, existem estudos incipientes com dados de lavouras, que também apontam o manejo de doenças como um dos principais fatores que causam a lacuna de produtividade (SENTELHAS *et al.*, 2015; TAGLIAPIETRA *et al.*, 2021; WINCK *et al.*, 2023).

Entretanto, os trabalhos realizados abordando o uso de fungicidas e doenças no Brasil, são conduzidos, na sua quase totalidade, em áreas experimentais, abordando fatores isolados, os quais, muitas vezes, não retratam as interações que ocorrem em nível de lavouras (DALLA LANA *et al.*, 2018; GODOY *et al.*, 2016, 2023). Enquanto muitos esforços de pesquisas foram direcionados para a avaliação de fungicidas e desenvolvimento de cultivares resistentes, pouco foi abordado sobre as interações de índice de área foliar, duração do ciclo de desenvolvimento das cultivares, ambiente e manejo de doenças (MOREIRA *et al.*, 2015). O estudo dessas interações através de experimentos onde os pesquisadores propõem seletivamente as práticas de manejo utilizadas apresenta algumas limitações como, alta complexidade para avaliar mais de dois fatores em conjunto, alto custo e demanda de mão de obra. Assim, a utilização de dados de lavoura aparece como uma alternativa para integrar os fatores de manejo nas análises, trazendo resultados que traduzem a realidade das lavouras e que podem ser efetivamente implementados pelos agricultores (ANDRADE *et al.*, 2022).

Neste sentido, para fazer um manejo mais eficiente de doenças em soja, é necessário entender e classificar os ambientes de produção de acordo com a similaridade climática (ASSEFA *et al.*, 2016; CASSMAN; GRASSINI, 2020; CORASSA *et al.*, 2018; GRASSINI *et al.*, 2015). Para realizar esta classificação, podemos utilizar o potencial de produtividade limitado por água (SHAH *et al.*, 2021). O potencial de produtividade limitado por água é o máximo que se pode produzir em um determinado ambiente com o volume, distribuição pluviométrica e características de solo (VAN ITTERSUM;

RABBINGE, 1997; VAN ITTERSUM *et al.*, 2013). SHAH *et al.*, (2021) trabalhando com dados de lavouras no centro-norte dos Estados Unidos, comparou lavouras que receberam aplicações de fungicidas com lavouras que não receberam e concluíram que houve um benefício econômico na adoção de aplicações de fungicidas, Além de identificar um maior retorno econômico nas lavouras com maiores produtividades. No custo de produção das lavouras de soja no Brasil, o controle de doenças também representa um valor importante, sendo estimado para um valor de 2,2 bilhões de dólares somente para o controle da principal doença da soja, a ferrugem asiática (GODOY *et al.*, 2016).

A interpretação dos fatores que causam a lacuna de produtividade em cada ambiente de produção permite desenvolver ferramentas de manejo mais acuradas, levando a um manejo mais racional dos insumos e com alta eficiência no uso dos recursos naturais. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi quantificar a influência do número de aplicações de fungicidas sobre a produtividade de lavouras de soja em função de fatores biofísicos e de manejo adotados no Rio Grande do Sul, Brasil, por meio da análise de dados de 1163 lavouras, avaliadas nas safras 2016/2017 até 2021/2022.

2.3 MATERIAL E MÉTODOS

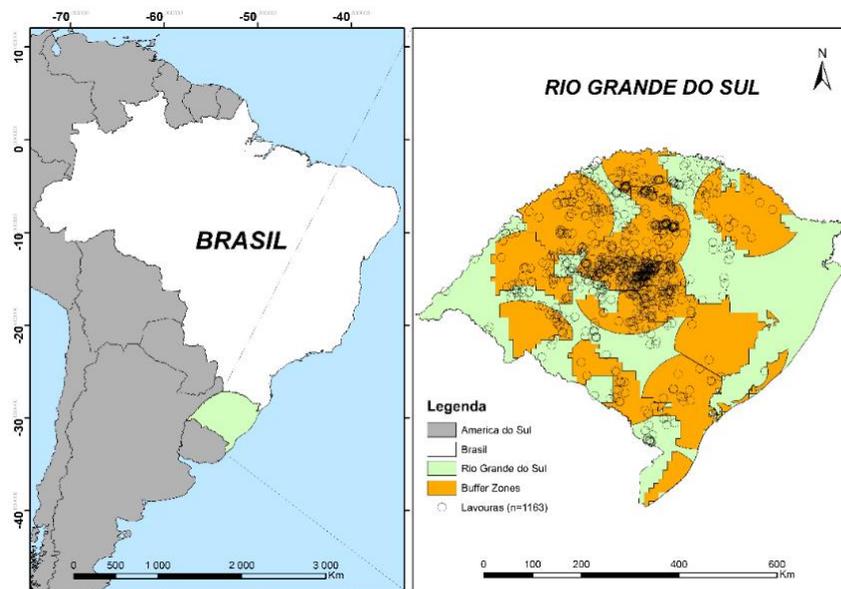
2.3.1 Dados de lavouras e caracterização da região

Informações de manejo e produtividade foram coletadas durante seis safras (2016/2017, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) através de aplicação de questionários, totalizando 1163 lavouras de soja no sul do Brasil. Os dados de manejo coletados foram: data de semeadura, grupo de maturidade relativa da cultivar, cultivar, número de aplicação de fungicidas foliares, momento (data ou estágio de desenvolvimento) que as aplicações de fungicidas foliares começaram, e produtividade da lavoura. Mais informações podem ser encontradas em WINCK *et al.*, (2023).

A área em estudo foi dividida em 12 *buffer zones* que foram determinadas pela sazonalidade de temperatura, soma térmica anual e o índice de aridez, juntamente com a presença de uma estação meteorológica (TAGLIAPIETRA *et al.*, 2021). A partir da localização de cada lavoura foi identificada a *buffer zone* para a estimativa do potencial de produtividade limitado por água da lavoura. Quando a localização não correspondia à área de abrangência das *buffer zones*, a lavoura não foi incluída nas análises relacionadas ao potencial de produtividade limitado por água, sendo assim foi possível estimar o potencial de produtividade limitado por água de 841 lavouras (Figura 1).

FIGURA 1 - Mapa do Brasil, destacando a região de estudo (Rio Grande do Sul). Os círculos pretos vazios representam a localização das 1163 lavouras avaliadas em seis safras (2016/2017, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022). A cor laranja representa a área de abrangências das *buffer zones* utilizadas. As estrelas azuis representam a localização das estações meteorológicas.

Fonte: Autor



2.3.2 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram medidos por estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia e estão localizadas nas *buffer zones* utilizadas no estudo. As estações localizam-se nos municípios de Alegrete, Bagé, Cachoeira do Sul, Camaquã, Cruz Alta, Iraí, Lagoa Vermelha, Pelotas, Santa Maria, Santa Vitória do Palmar, Santana do Livramento e São Luiz Gonzaga, no Rio Grande do Sul (Figura 1). Nessas estações, foram coletados dados diários de temperatura máxima e mínima, radiação solar, precipitação pluviométrica, velocidade do vento e umidade relativa no período de 2016/2017 até 2021/2022. Quando foram encontradas falhas no banco de dados meteorológicos, utilizou-se, para preenchimento, dados obtidos através de POWER-NASA data (<http://power.larc.nasa.gov/data-accesses-viewer>).

2.3.3 Potencial de produtividade e potencial de produtividade limitado por água

O potencial de produtividade e o potencial de produtividade limitado por água foram estimados utilizando o CSM-CROPGRO-Soybean (BOOTE *et al.*, 2003). A calibração realizada por MERCAU *et al.*, (2007) e MONZON *et al.*, (2007) e validação para o Brasil por RIBAS *et al.*, (2021), TAGLIAPIETRA *et al.*, (2021) e MARIN *et al.*, (2022). O tipo de solo representativo para cada *buffer zone* foi definido de acordo com STRECK *et al.*, (2008). Assim, o potencial produtivo sem e com limitação por água foi

estimado para cada *buffer zone* e atribuído para cada lavoura. A lacuna de água foi estimada pela equação um e lacuna de manejo foi calculada pela equação 2.

$$La = PP - PPa \quad (1)$$

em que: La é a lacuna de água, PP é potencial de produtividade e PPa é potencial de produtividade limitado por água.

$$Lm = PPa - Pl \quad (2)$$

em que: Lm é a lacuna de manejo, PPa é potencial de produtividade limitado por água e Pl é a produtividade obtida na lavoura.

2.3.4 Análise dos dados

De acordo com a distribuição da produtividade informada as lavouras foram classificadas em tercís, utilizando o software Infostat (BALZARINI *et al.*, 2001). O tercil superior representa as lavouras de alta produtividade (AP) e, o tercil inferior, as lavouras de baixa produtividade (BP) (GRASSINI *et al.*, 2015). As variáveis analisadas foram comparadas utilizando teste *t* (dados paramétricos) e teste de Wilcoxon (dados não paramétricos). Para realizar a relação entre dados quantitativos, foi utilizado o modelo de função limite, descrita por FRENCH e SCHULTZ, (1984), amplamente utilizada em estudos que envolvem dados de lavouras (GRASSINI *et al.*, 2015; RIBAS *et al.*, 2021; TAGLIAPIETRA *et al.*, 2021; WINCK *et al.*, 2023). Uma árvore de regressão foi gerada, utilizando o software R (R CORE TEAM, 2023) com as lavouras que obtiveram produtividades acima de 80% do potencial de produtividade limitado por água, desta árvore foram retirados os valores de importância de cada variável (RIZZO *et al.*, 2023).

Para os dados relativos ao grupo de maturidade relativa das cultivares, foi calculada a média das produtividades para cada número de aplicação e ano. Com os valores médios de produtividade, foi definido um valor médio de produtividade para cada aplicação em cada grupo de maturidade relativa para os 6 anos avaliados.

2.4 RESULTADOS

As lavouras do tercil de altas produtividades produziram 148% a mais que as lavouras classificadas como de baixas produtividades. Os fatores analisados que explicaram a diferença entre as lavouras de altas e baixas produtividades foram os seguintes: lacuna de água, data de semeadura, número de aplicações de fungicidas foliares e o grupo de maturidade relativa das cultivares (Tabela 1).

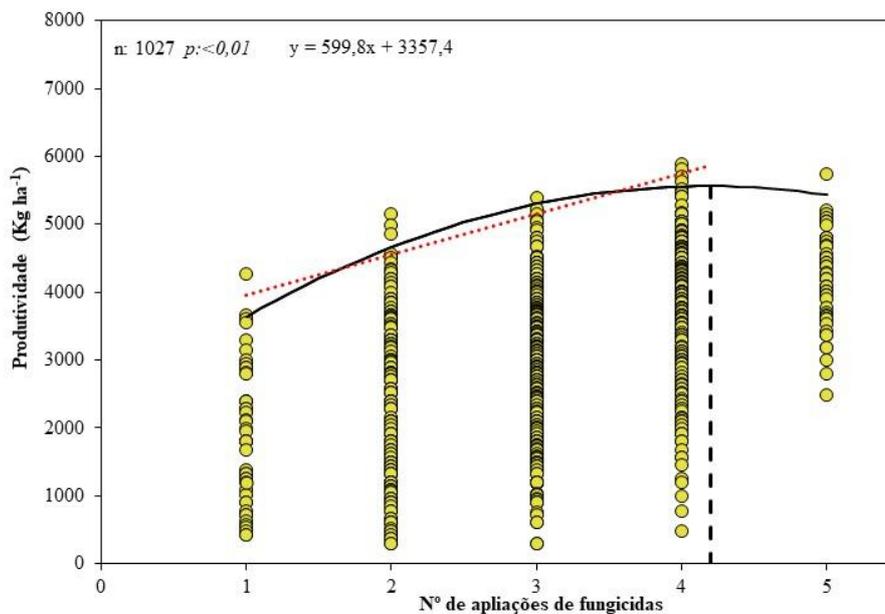
Tabela 1 - Comparação de práticas de manejo e insumos aplicados entre os tercis de alta e baixa produtividade de 1163 lavouras de soja no Rio Grande do Sul, Brasil. Os valores indicam as diferenças médias entre os tercis de produtividade superior e inferior. As médias são indicadas para cada variável no campo altas produtividades e baixas produtividades. Os asteriscos indicam significância em $p < 0,01^*$.

Variável	Unidade	N	Alta produtividades	Baixas produtividades	Diferença
Data de Semeadura	Data	836	08 de novembro	15 de novembro	-7,0*
Produtividade	kg ha ⁻¹	836	4205,6	1697,7	2507,9*
Aplicações de fungicidas	Número de aplicações	836	3,5	2,5	1,0*
Lacuna de água	kg ha ⁻¹	498	675,2	2572,7	-1897,5*
Lacuna de Manejo	kg ha ⁻¹	498	2020,6	2010,9	9,7
GMR	Unidade	810	5,8	6,0	0,2*

Fonte: Autor

Através do uso de uma função limite entre número de aplicações de fungicidas e a produtividade das lavouras, foi observado um aumento de produtividade de 599,8 kg ha⁻¹ para cada aplicação entre uma e quatro e dois décimos de aplicações (Figura 2). A partir de quatro e dois décimos de aplicações, em situações não limitantes (lavouras sem deficiência nutricional, sem interferência de plantas daninhas e pragas, com disponibilidade hídrica e população de plantas adequada), não ocorreu incremento da produtividade das lavouras de soja.

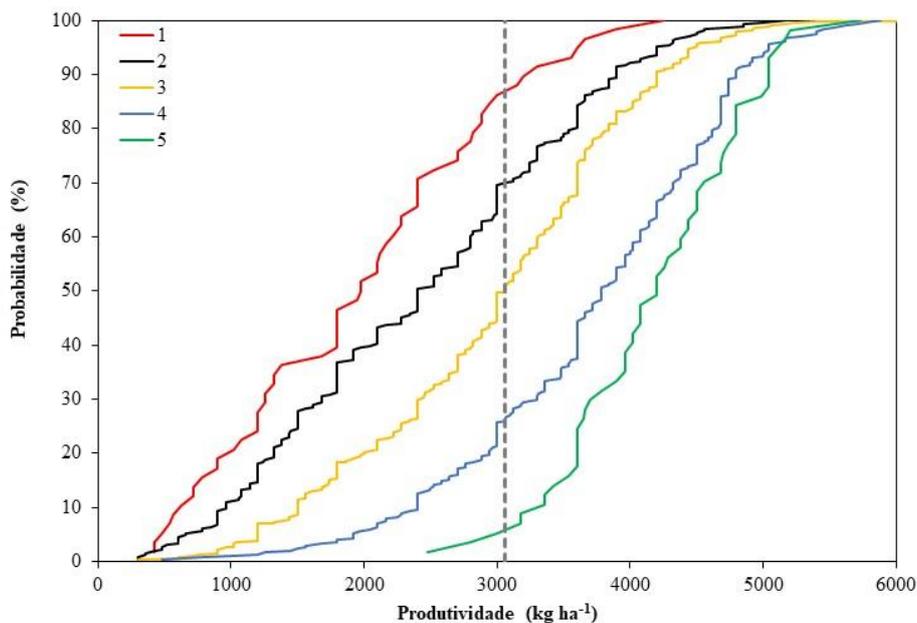
FIGURA 2—Relação ente produtividade e número de aplicações de fungicidas em lavouras de soja. A linha preta é a função limite. A linha tracejada vermelha representa a regressão linear ($y=599,8x + 3357,4$) entre a produtividade e uma a quatro e dois décimos de aplicações de fungicidas foliares. Dados de 1163 lavouras de 6 safras (2016/2017, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022).



Fonte: Autor

As maiores probabilidades de se obter produtividades acima da média das lavouras avaliadas ($3056,5 \text{ kg ha}^{-1}$) foram observadas para as lavouras que receberam um número maior de aplicação de fungicidas. Para quatro e cinco aplicações de fungicidas, a probabilidade de obtenção de produtividade acima da média foi de 74% e 92%, respectivamente, (figura 3). Para três aplicações de fungicidas, essa probabilidade diminuiu para 50%.

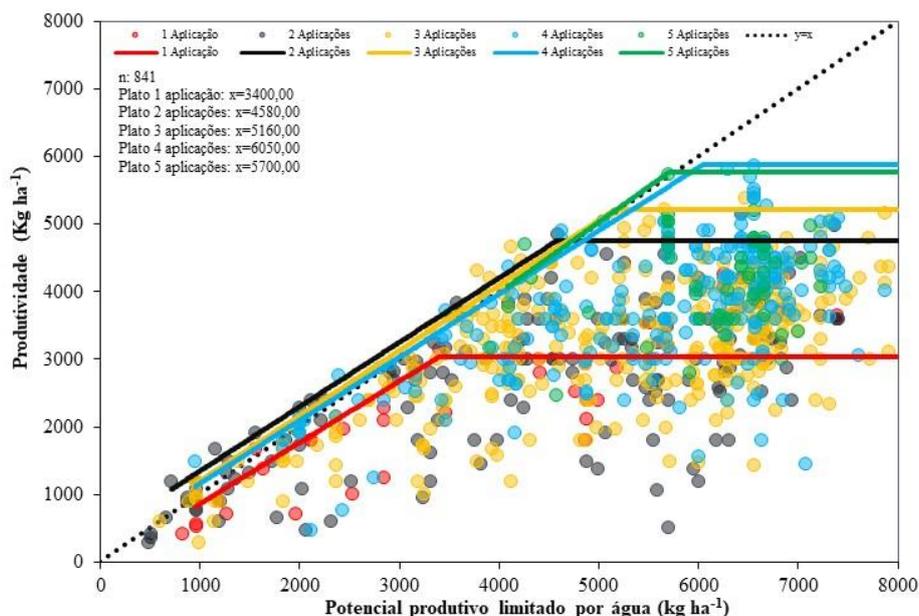
FIGURA 3 - Análise de probabilidade de se atingir produtividades abaixo ou acima da média das lavouras ($3056,5 \text{ kg ha}^{-1}$) (linha cinza tracejada) em função do número de aplicações de fungicidas foliares. Dados de 1163 lavouras de 6 safras (2016/2017, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022). A cor de cada linha representa o número de aplicações de fungicidas foliares recebidas por cada lavoura, sendo: uma aplicação (vermelha), duas aplicações (preta), três aplicações (amarela), quatro aplicações (azul) e cinco aplicações (verde).



Fonte: Autor

Para caracterizar a resposta ao ambiente, foi determinado o número ótimo de aplicações para cada ambiente de produção através da relação entre o potencial de produtividade limitado pela água, o número de aplicações de fungicidas e a produtividade das lavouras (Figura 4). O número ótimo de aplicações de fungicidas foliares foi dependente do potencial limitado por água. Para um potencial de produtividade limitado por água de até 3400 kg ha⁻¹, foi verificado que o número ótimo foi de apenas uma aplicação de fungicida. Quando o potencial de produtividade limitado por água aumentou para 4580 kg ha⁻¹, o número ótimo de aplicações ao longo do ciclo da cultura foi de duas aplicações, enquanto três aplicações de fungicidas foram suficientes para um potencial de produtividade limitado por água de até 5160 kg ha⁻¹. Para um potencial de produtividade limitado por água de até 6050 kg ha⁻¹, o número ótimo de aplicações aumentou para quatro aplicações. Em contrapartida, não foi observado aumento na produtividade com cinco aplicações de fungicidas.

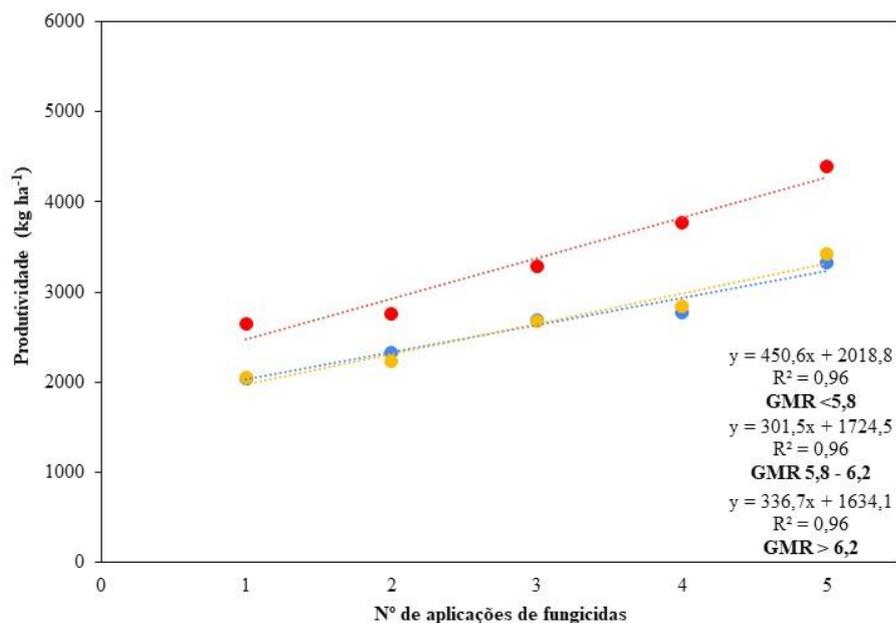
FIGURA 4 -Relação entre potencial produtivo limitado por água e produtividade obtida em cada lavoura em função do número de aplicações de fungicidas foliares. Dados de 841 lavouras de 6 safras (2016/2017, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022).



Fonte: Autor

Quando o componente genético foi incluído nas análises, houve uma relação significativa entre o número de aplicações de fungicidas foliares e a resposta em produtividade para os grupos de maturidade relativa (GMR) das cultivares (Figura 5). Análises de regressão linear demonstraram que houve um ganho de $450,6 \text{ kg ha}^{-1}$ para cada aplicação de fungicidas (entre uma e cinco aplicações) para cultivares com GMR menor que 5,8. Por outro lado, GMR entre 5,8 e 6,2 o incremento foi de $301,5 \text{ kg ha}^{-1}$, próxima à observada para GMR maior que 6,2, em que a resposta foi de $336,7 \text{ kg ha}^{-1}$ para cada aplicação.

FIGURA 5 -Resposta de grupos de maturidade relativa ao número de aplicações de fungicidas foliares. Os pontos vermelhos são cultivares com GMR menor que 5,8. Os pontos azuis são cultivares com GMR entre 6,8 e 6,2. Os pontos amarelos são cultivares com GMR maior que 6,2. A linha tracejada vermelha representa a regressão linear para cultivares com GMR menor que 5,8, a linha tracejada azul para cultivares com GMR entre 5,8 e 6,2 e a linha tracejada amarela para cultivares com GMR maior que 6,2. Dados de 1132 lavouras de 6 safras (2016/2017, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022).



Fonte: Autor

2.5 DISCUSSÃO

Este estudo traz novas evidências do impacto do número de aplicações de fungicidas foliares na produtividade de lavouras de soja. Este é o primeiro trabalho que integra a resposta do número de aplicações de fungicidas foliares com o potencial de produtividade limitado por água e fatores de manejo em lavouras de soja. Foram determinadas as perdas pela adoção de práticas de manejo subótimas para o manejo de doenças em soja, assim como foram sugeridos parâmetros para auxiliar na tomada de decisão sobre o número de aplicações de fungicidas foliares. Ajustes no número de aplicações de fungicidas, em função do ambiente de produção e práticas de manejo podem aumentar significativamente a produtividade das lavouras, a rentabilidade da produção de soja e atenuar o impacto ambiental pelo manejo de fungicidas em lavouras.

Estudos recentes reportaram a importância das doenças da soja como causadoras de lacunas produtivas no Rio Grande do Sul (SENTELHAS *et al.*, 2015; TAGLIAPIETRA *et al.*, 2021; WINCK *et al.*, 2023). Da mesma forma, na Argentina e nos Estados Unidos foram relatadas perdas de produtividade por doenças foliares em lavouras de soja (DI MAURO *et al.*, 2018; MOURTZINIS *et al.*, 2018). Porém, ao nosso conhecimento, nenhum estudo relacionou a perda de produtividade de lavouras e o número de aplicações de fungicidas foliares, considerando o potencial de produtividade limitado por água.

Os resultados mostraram um dano potencial de 599,8 kg ha⁻¹ para cada aplicação não realizada entre uma e quatro e dois décimos de aplicações de fungicidas foliares (Figura 1). Estes resultados mostram a importância do controle de doenças nas lavouras de soja no sul do Brasil, visto que, com o aumento da severidade das doenças, ocorre uma redução na área foliar fotossinteticamente ativo e da interceptação de radiação solar (KUMUDINI *et al.*, 2008). A redução da área foliar e da interceptação da radiação foliar tem um impacto ainda maior quando ocorre durante o período de formação de legumes e enchimento de grãos da soja (MONZON *et al.*, 2021) e em cultivares com ciclos precoce (TAGLIAPIETRA *et al.*, 2018). O resultado encontrado para máxima resposta à aplicação pode ajudar produtores a entender qual é o retorno potencial que podem atingir ao adotar um maior número de aplicações foliares de fungicidas em lavouras que não apresentem nenhuma outra limitação, ou seja, áreas bem manejadas, irrigadas ou em anos de clima favorável.

As probabilidades de obter produtividade acima da média das lavouras está associada com a adoção de maior número de aplicações fungicidas foliares (Figura 3). Como as doenças compreendem os fatores que reduzem a produtividade das culturas agrícolas (VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997; VAN ITTERSUM *et al.*, 2013) é esperado que o manejo adequado promova a redução da lacuna de produtividade (VAN ITTERSUM *et al.*, 2013). Neste sentido, considerando a média das produtividades (3056,5 kg ha⁻¹) e a probabilidade de se atingir produtividades acima desta, podemos afirmar que as lavouras que recebem de quatro a cinco aplicações de fungicidas tem um manejo menos propenso a perdas de produtividade, principalmente quando associado as lavouras com maiores expectativas de produtividade (Figura 3).

Compreender a interação do potencial de produtividade limitado por água (ambiente) ambientes eo número de aplicação de fungicidas (Figura 4)permite propor a construção de um manejo de doenças em lavouras de soja eficiente e ajustado a cada lavoura.Essa abordagem corrobora com os resultados encontrados nos Estados Unidos, onde as lavouras com maior potencial de produtividade limitado por água respondem mais a melhorias no manejo de doenças, ou seja, um maior número de aplicações de fungicidas foliares(SHAH *et al.*, 2021).

As lavouras com maior potencial de produtividade limitado por água justificaram um maior número de aplicações de fungicidas foliares (Figura 4). Lavouras com potencial de produtividade limitado por água de 6050kg ha⁻¹ apresentam resposta positiva a até quatro aplicação de fungicidas foliares durante o ciclo da cultura. À medida que diminui

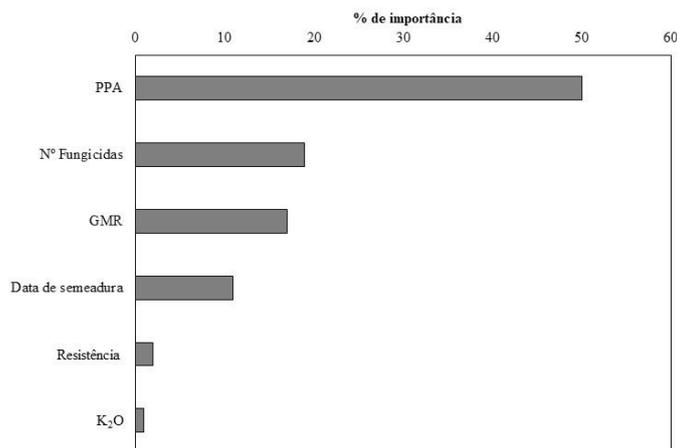
o potencial de produtividade limitado por água, o número de aplicações necessárias para não ocorrer perdas de produtividade foi cada vez menor. Foram encontrados patamares de potencial de produtividade limitado por água em que o número de aplicações realizadas necessárias foi diferente. Isso, provavelmente está ligado com o menor volume de precipitação pluviométrica (ambiente menos favorável para os patógenos) dessas áreas e com a menor necessidade de acúmulo de biomassa pela cultura (para um mesmo índice de colheita).

Assim, indica-se que o número ótimo de aplicações de fungicidas foliares para cada lavoura leve em consideração o potencial de produtividade limitado por água de cada lavoura, conforme sugerido por SHAH et al., (2021) nos Estados Unidos. No entanto, para cinco aplicações de fungicidas foliares ao longo do ciclo da cultura não se encontrou um incremento em produtividade, provavelmente isso é explicado pelo fato de que as lavouras que receberam cinco aplicações ficaram longe da produtividade potencial limitada por água do ambiente, em que as limitações de produtividade devem estar ligadas com outros fatores de manejo, como nutrição, controle de plantas daninhas, pragas e população de plantas.

A maior necessidade de aplicação em lavouras com maior potencial de produtividade limitado por água pode estar ligada a três fatores: 1) ambientes com maior potencial produtivo limitado por água apresentam ambientes com melhores condições de desenvolvimento de doenças pelo maior volume de chuva (BERUSKI *et al.*, 2020; DEL PONTE *et al.*, 2006); 2) IAF necessário para atingir cada patamar de produtividade, em que, com o aumento da produtividade, é necessária maior interceptação de radiação solar, portanto, maior IAF (WINCK *et al.*, 2020). 3) plantas mais vigorosas estarem mais suscetíveis a doenças biotróficas como a ferrugem asiática.

Quando foram avaliadas somente as lavouras que obtiveram produtividades acima de 80% do potencial de produtividade limitado por água, o número de aplicações de fungicidas foliares foi o primeiro fator biótico que promoveu perda de produtividade nas lavouras de soja no sul do Brasil (Figura 6).

FIGURA 6 - Importância de cada variável para a produtividade em lavouras com lacuna de produtividade menor que 20%. PPA = Potencial de produtividade limitado por água. Nº Fungicidas = Número de aplicações de fungicidas foliares. GMR = Grupo de Maturidade Relativa. Data de semeadura = Data de semeadura da lavoura. Resistência = Tecnologia de resistência a ferrugem asiática da soja. K₂O = Quantidade aplicada de fertilizante fonte de potássio.



Fonte: Autor

A duração do ciclo de desenvolvimento das cultivares GMR influenciou a resposta à aplicação de fungicidas foliares (Figura 5). Cultivares com menor GMR (<5,8) apresentam maior resposta ao número de aplicações de fungicidas que cultivares com maior GMR (>6,2), 450,6kg ha⁻¹e 336,7kg ha⁻¹ para cada aplicação de fungicidas foliares, respectivamente. Esses resultados corroboram com Moreira *et al.*, (2015), que observaram que as cultivares mais precoces foram mais sensíveis aos danos causados por doenças foliares. As cultivares com menor GMR apresentam um índice de área foliar máximo menor do que cultivares com maior GMR, assim como o índice de área foliar máximo atingido é muito próximo do índice de área foliar ótimo para a cultura (TAGLIAPIETRA *et al.*, 2018), ou seja, qualquer perda na área foliar em cultivares precoces pode acarretar perda de produtividade, enquanto em GMR mais longos existe excedente entre o índice de área foliar máximo e o índice de área foliar ótimo, assim uma pequena perda de área foliar não acarreta perda de produtividade. A partir desses resultados, sugere-se que indicações de manejo como, utilizar ciclos mais curtos para facilitar o controle de doenças devem ser ajustados (DALLA LANA *et al.*, 2018).

Os produtores fizeram, em média 3,2 aplicações de fungicidas foliares durante o ciclo de desenvolvimento nas lavouras de soja do Sul do Brasil, enquanto o potencial de produtividade limitado por água estimado no período de estudo foi de 5.121 kg ha⁻¹. A partir dos critérios para o número de aplicações de fungicidas foliares de acordo com o potencial de produtividade limitado por água (Figura 4), apenas 29,8% dos produtores realizaram o número ótimo de aplicações, 33,4% realizaram menos aplicações do que o necessário e 36,8% realizaram aplicações acima do ideal. Vale ressaltar que nossos

estudos não abordaram o momento de realizar as aplicações de fungicidas, bem como quais os ingredientes ativos mais eficientes em cada lavoura.

Os resultados deste estudo apontam que agrônomos, consultores técnicos e agricultores podem ajustar o número de aplicações de fungicidas foliares em lavouras de soja de acordo com o potencial de produtividade limitado por água de cada lavoura de soja e ciclo de desenvolvimento das cultivares, impactando em redução de custos e/ou aumentos de produtividades das lavouras.

2.6 CONCLUSÃO

O ganho potencial por realizar uma aplicação de fungicidas foliares foi de 599,8 kg ha⁻¹.

O potencial de produtividade limitado por água da lavoura deve ser utilizado para realizar determinar o número de aplicações de fungicidas foliares em lavouras de soja.

O impacto da adoção de um número de aplicações de fungicidas foliares subótimo em cultivares com grupo de maturidade relativa menor que 5,8 é maior que em cultivares de maior ciclo de desenvolvimento.

2.7 AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos alunos da Equipe FieldCrops da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e aos extensionistas da Emater/RS-Ascar pelo auxílio na coleta, organização e digitação dos dados dos questionários. Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) do Ministério da Educação do Brasil por conceder uma bolsa de estudos a Enrico Fleck Tura. A coleta de dados para este projeto foi financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS - 19/2551-0001648-4).

2.8 REFERÊNCIAS

ANDRADE, José F. *et al.* Field validation of a farmer supplied data approach to close soybean yield gaps in the US North Central region. **Agricultural Systems**, [s. l.], v. 200, p. 103434, 2022. Disponível em: Acesso em: 20 ago. 2023.

- ARAMBURU MERLOS, Fernando *et al.* Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 184, p. 145–154, 2015. Disponível em: Acesso em: 15 ago. 2023.
- ASSEFA, Yared *et al.* Yield Responses to Planting Density for US Modern Corn Hybrids: A Synthesis-Analysis. **Crop Science**, [s. l.], v. 56, n. 5, p. 2802–2817, 2016.
- BALZARINI, M *et al.* Software estadístico INFOSTAT. Manual de usuario, Versión 1. **Córdoba. Argentina**, [s. l.], 2001.
- BERUSKI, Gustavo C. *et al.* Performance and Profitability of Rain-Based Thresholds for Timing Fungicide Applications in Soybean Rust Control. **Plant Disease**, [s. l.], v. 104, n. 10, p. 2704–2712, 2020.
- BOOTE, K. J. *et al.* Genetic Coefficients in the CROPGRO–Soybean Model. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 95, n. 1, p. 32, 2003.
- CASSMAN, Kenneth G.; GRASSINI, Patricio. A global perspective on sustainable intensification research. **Nature Sustainability**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 262–268, 2020.
- CONAB, COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. Brasília, DF: [s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 15 ago. 2023.
- CORASSA, Geomar M. *et al.* Optimum Soybean Seeding Rates by Yield Environment in Southern Brazil. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 110, n. 6, p. 2430–2438, 2018.
- DALLA LANA, Felipe *et al.* Meta-Analytic Modeling of the Decline in Performance of Fungicides for Managing Soybean Rust after a Decade of Use in Brazil. **Plant Disease**, [s. l.], v. 102, n. 4, p. 807–817, 2018.
- DEL PONTE, Emerson M. *et al.* Models and applications for risk assessment and prediction of Asian soybean rust epidemics. **Fitopatologia Brasileira**, [s. l.], v. 31, n. 6, p. 533–544, 2006.
- DI MAURO, Guido *et al.* Environmental and management variables explain soybean yield gap variability in Central Argentina. **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 99, p. 186–194, 2018. Disponível em: Acesso em: 15 ago. 2023.
- FRENCH, RJ; SCHULTZ, JE. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. II. some limitations to efficiency. **Australian Journal of Agricultural Research**, [s. l.], v. 35, n. 6, p. 765, 1984.

- GODOY, Cláudia Vieira *et al.* Asian soybean rust in Brazil: past, present, and future. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 51, n. 5, p. 407–421, 2016.
- GODOY, C. V. *et al.* **Eficiência de fungicidas para o controle da ferrugem-asiática da soja, *Phakopsora pachyrhizi*, na safra 2022/2023: resultados sumarizados dos ensaios cooperativos.** Londrina: Embrapa Soja, 2023.
- GRASSINI, Patricio *et al.* High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 120, n. 1, p. 142–150, 2011.
- GRASSINI, Patricio *et al.* Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 179, p. 150–163, 2015. Disponível em: Acesso em: 15 ago. 2023.
- GYGA. **Global Yield Gap and Water Productivity Atlas**. [S. l.], 2023. Disponível em: <http://www.yieldgap.org/>. Acesso em: 14 ago. 2023.
- KUMUDINI, S. *et al.* Mechanisms Involved in Soybean Rust-Induced Yield Reduction. **Crop Science**, [s. l.], v. 48, n. 6, p. 2334–2342, 2008.
- LOBELL, David B.; CASSMAN, Kenneth G.; FIELD, Christopher B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. **Annual Review of Environment and Resources**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 179–204, 2009.
- MARIN, Fabio R. *et al.* Protecting the Amazon forest and reducing global warming via agricultural intensification. **Nature Sustainability**, [s. l.], v. 5, n. 12, p. 1018–1026, 2022.
- MERCAU, J. L. *et al.* Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 100, n. 2–3, p. 200–209, 2007. Disponível em: Acesso em: 15 ago. 2023.
- MONZON, Juan Pablo *et al.* Critical period for seed number determination in soybean as determined by crop growth rate, duration, and dry matter accumulation. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 261, p. 108016, 2021. Disponível em: Acesso em: 15 ago. 2023.
- MONZON, J. P. *et al.* Modelling management strategies for wheat–soybean double crops in the south-eastern Pampas. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 101, n. 1, p. 44–52, 2007. Disponível em: Acesso em: 15 ago. 2023.
- MOREIRA, E. N. *et al.* Temporal Dynamics of Soybean Rust Associated With Leaf Area Index in Soybean Cultivars of different Maturity Groups. **Plant Disease**, [s. l.], v. 99, n. 9, p. 1216–1226, 2015.

- MOURTZINIS, Spyridon *et al.* Sifting and winnowing: Analysis of farmer field data for soybean in the US North-Central region. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 221, p. 130–141, 2018.
- R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: <https://www.R-project.org/>, 2023.
- RIBAS, Giovana Ghisleniet *al.* Assessing factors related to yield gaps in flooded rice in southern Brazil. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 113, n. 4, p. 3341–3350, 2021.
- RIZZO, Gonzalo *et al.* A farmer data-driven approach for prioritization of agricultural research and development: A case study for intensive crop systems in the humid tropics. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 297, p. 108942, 2023.
- SENTELHAS, P. C. *et al.* The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **The Journal of Agricultural Science**, [s. l.], v. 153, n. 8, p. 1394–1411, 2015.
- SHAH, Denis A. *et al.* A machine learning interpretation of the contribution of foliar fungicides to soybean yield in the north-central United States. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 18769, 2021.
- STRECK, Edemar Valdir *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. [S. l.]: UFRGS: EMATER/RS-ASCAR Porto Alegre, 2008. v. 2
- TAGLIAPIETRA, Eduardo Lago *et al.* Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 113, n. 2, p. 1882–1894, 2021.
- TAGLIAPIETRA, Eduardo Lago *et al.* Optimum Leaf Area Index to Reach Soybean Yield Potential in Subtropical Environment. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 110, n. 3, p. 932–938, 2018.
- USDA. **USDA FAS. The Foreign Agricultural Service**. . [S. l.], 2023.
- VAN ITTERSUM, Martin K. *et al.* Yield gap analysis with local to global relevance—A review. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 143, p. 4–17, 2013. Disponível em: Acesso em: 15 ago. 2023.
- VAN ITTERSUM, M. K.; RABBINGE, R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 52, n. 3, p. 197–208, 1997. Disponível em: Acesso em: 19 ago. 2023.
- WINCK, José Eduardo Minussiet *al.* Decomposition of yield gap of soybean in environment × genetics × management in Southern Brazil.

European Journal of Agronomy, [s. l.], v. 145, p. 126795, 2023. Disponível em:
Acesso em: 15 ago. 2023.

WINCK, Jose Eduardo Minussi *et al.* Spatial arrangement of plants on leaf growth and development and the yield potential of soybean. **Australian Journal of Crop Science**, Lismore, N.S.W., v. 14, n. 6, p. 913, 2020. Disponível em: <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.313481127074409>.

YUAN, Shen *et al.* Sustainable intensification for a larger global rice bowl. **Nature Communications**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 7163, 2021.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo revelam a importância da implementação de aplicações de fungicidas foliares para produtividade da soja. O ganho potencial médio de 599,8 kg ha⁻¹ demonstra o impacto dessas aplicações no rendimento das culturas. Lavouras que receberam mais de três aplicações de fungicidas foliares apresentaram maior probabilidade de alcançar níveis de produtividade superiores à média.

Considerar o potencial de produtividade limitado por água no manejo como um componente no manejo de doenças auxilia a definir manejos mais precisos, evitando perdas de produtividade por realizar menos aplicações que o necessário, ou aplicações acima do ideal em situações em que estas não se justificam. Onde em lavouras com o maior potencial de produtividade limitado por água são necessárias maiores número de aplicações de fungicidas.

Para cultivares com GMR mais precoce (<5,8) o manejo de aplicações de fungicidas deve ser mais criterioso, visto que a variação de produtividade encontrada pela adoção de aplicações de fungicidas foliares foi maior, onde para a adoção de uma aplicação a mais entre um e cinco aplicações incrementa a produtividade na lavoura próximo a 450,6 kg ha⁻¹.

Os resultados deste trabalho auxiliam a produtores, técnicos e pesquisadores a compreender o manejo de aplicações de fungicidas foliares em soja, utilizando parâmetros relacionados a interação de genótipo, ambiente e manejo. Apontando indicadores que podem ser utilizados para a construção de manejos mais eficientes e assertivos.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, José F. *et al.* Field validation of a farmer supplied data approach to close soybean yield gaps in the US North Central region. **Agricultural Systems**, [s. l.], v. 200, p. 103434, 2022. Disponível em: Acesso em: 20 ago. 2023.
- ARAMBURU MERLOS, Fernando *et al.* Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 184, p. 145–154, 2015. Disponível em: Acesso em: 15 ago. 2023.
- ASSEFA, Yared *et al.* Yield Responses to Planting Density for US Modern Corn Hybrids: A Synthesis-Analysis. **Crop Science**, [s. l.], v. 56, n. 5, p. 2802–2817, 2016.
- AZEVEDO, L.A.S. **Proteção integrada de plantas com fungicidas**. São Paulo, Ed. Autor, 2001.
- BALZARINI, M *et al.* Software estadístico INFOSTAT. Manual de usuario, Versión 1. **Córdoba. Argentina**, [s. l.], 2001.
- BERUSKI, Gustavo C. *et al.* Performance and Profitability of Rain-Based Thresholds for Timing Fungicide Applications in Soybean Rust Control. **Plant Disease**, [s. l.], v. 104, n. 10, p. 2704–2712, 2020.
- BOOTE, K. J. *et al.* Genetic Coefficients in the CROPGRO–Soybean Model. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 95, n. 1, p. 32, 2003
- CASSMAN, Kenneth G.; GRASSINI, Patricio. A global perspective on sustainable intensification research. **Nature Sustainability**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 262–268, 2020.
- CONAB, COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. Brasília, DF: [s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 15 ago. 2023.
- CORASSA, Geomar M. *et al.* Optimum Soybean Seeding Rates by Yield Environment in Southern Brazil. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 110, n. 6, p. 2430–2438, 2018.
- DALLA LANA, Felipe *et al.* Meta-Analytic Modeling of the Decline in Performance of Fungicides for Managing Soybean Rust after a Decade of Use in Brazil. **Plant Disease**, [s. l.], v. 102, n. 4, p. 807–817, 2018.
- DEL PONTE, Emerson M. *et al.* Models and applications for risk assessment and prediction of Asian soybean rust epidemics. **Fitopatologia Brasileira**, [s. l.], v. 31, n. 6, p. 533–544, 2006.

- DI MAURO, Guido *et al.* Environmental and management variables explain soybean yield gap variability in Central Argentina. **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 99, p. 186–194, 2018. Disponível em: Acesso em: 15 ago. 2023.
- FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <http://www.fao.org/>. Acessado em: 2022.
- FRENCH, RJ; SCHULTZ, JE. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. II. some limitations to efficiency. **Australian Journal of Agricultural Research**, [s. l.], v. 35, n. 6, p. 765, 1984.
- GODOY, Cláudia Vieira *et al.* Asian soybean rust in Brazil: past, present, and future. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 51, n. 5, p. 407–421, 2016.
- GODOY, C. V. *et al.* **Eficiência de fungicidas para o controle da ferrugem-asiática da soja, *Phakopsora pachyrhizi*, na safra 2022/2023: resultados sumarizados dos ensaios cooperativos**. Londrina: Embrapa Soja, 2023.
- GRASSINI, Patricio *et al.* High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 120, n. 1, p. 142–150, 2011.
- GRASSINI, Patricio *et al.* Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 179, p. 150–163, 2015. Disponível em: Acesso em: 15 ago. 2023.
- KUMUDINI, S. *et al.* Mechanisms Involved in Soybean Rust-Induced Yield Reduction. **Crop Science**, [s. l.], v. 48, n. 6, p. 2334–2342, 2008.
- LOBELL, David B.; CASSMAN, Kenneth G.; FIELD, Christopher B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. **Annual Review of Environment and Resources**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 179–204, 2009.
- MARIN, Fabio R. *et al.* Protecting the Amazon forest and reducing global warming via agricultural intensification. **Nature Sustainability**, [s. l.], v. 5, n. 12, p. 1018–1026, 2022.
- MERCAU, J. L. *et al.* Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 100, n. 2–3, p. 200–209, 2007. Disponível em: Acesso em: 15 ago. 2023.
- MONZON, Juan Pablo *et al.* Critical period for seed number determination in soybean as determined by crop growth rate, duration, and dry matter accumulation. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 261, p. 108016, 2021. Disponível em: Acesso em: 15 ago. 2023.

- MONZON, J. P. *et al.* Modelling management strategies for wheat–soybean double crops in the south-eastern Pampas. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 101, n. 1, p. 44–52, 2007. Disponível em: Acesso em: 15 ago. 2023.
- MOREIRA, E. N. *et al.* Temporal Dynamics of Soybean Rust Associated With Leaf Area Index in Soybean Cultivars of different Maturity Groups. **Plant Disease**, [s. l.], v. 99, n. 9, p. 1216–1226, 2015.
- MOURTZINIS, Spyridon *et al.* Sifting and winnowing: Analysis of farmer field data for soybean in the US North-Central region. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 221, p. 130–141, 2018.
- R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: <https://www.R-project.org/>, 2023.
- RIBAS, Giovana Ghisleniet *al.* Assessing factors related to yield gaps in flooded rice in southern Brazil. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 113, n. 4, p. 3341–3350, 2021.
- RIZZO, Gonzalo *et al.* A farmer data-driven approach for prioritization of agricultural research and development: A case study for intensive crop systems in the humid tropics. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 297, p. 108942, 2023.
- RONG, L.B et al. Yield gap and resource utilization efficiency of three major food crops in the world – A review. *Journal of Integrative Agriculture*, v. 20, n. 2, p. 349–362, 2021.
- SENTELHAS, P. C. *et al.* The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **The Journal of Agricultural Science**, [s. l.], v. 153, n. 8, p. 1394–1411, 2015.
- SHAH, Denis A. *et al.* A machine learning interpretation of the contribution of foliar fungicides to soybean yield in the north-central United States. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 18769, 2021.
- STRECK, Edemar Valdir *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. [S. l.]: UFRGS: EMATER/RS-ASCAR Porto Alegre, 2008. v. 2
- TAGLIAPIETRA, Eduardo Lago *et al.* Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 113, n. 2, p. 1882–1894, 2021.
- TAGLIAPIETRA, Eduardo Lago *et al.* Optimum Leaf Area Index to Reach Soybean Yield Potential in Subtropical Environment. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 110, n. 3, p. 932–938, 2018.
- USDA. **USDA FAS. The Foreign Agricultural Service**. . [S. l.], 2023.

- VAN ITTERSUM, Martin K. *et al.* Yield gap analysis with local to global relevance—A review. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 143, p. 4–17, 2013. Disponível em: Acesso em: 15 ago. 2023.
- VAN ITTERSUM, M. K.; RABBINGE, R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 52, n. 3, p. 197–208, 1997. Disponível em: Acesso em: 19 ago. 2023.
- WINCK, José Eduardo Minussiet *al.* Decomposition of yield gap of soybean in environment × genetics × management in Southern Brazil. **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 145, p. 126795, 2023. Disponível em: Acesso em: 15 ago. 2023.
- WINCK, Jose Eduardo Minussiet *al.* Spatial arrangement of plants on leaf growth and development and the yield potential of soybean. **Australian Journal of Crop Science**, Lismore, N.S.W., v. 14, n. 6, p. 913, 2020. Disponível em: <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.313481127074409>.
- YUAN, Shen *et al.* Sustainable intensification for a larger global rice bowl. **Nature Communications**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 7163, 2021.