

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

José Eduardo Minussi Winck

**LACUNAS DE PRODUTIVIDADE EM SOJA NO RIO GRANDE DO SUL E
CARACTERIZAÇÃO FISIOLÓGICA DE GENÓTIPOS COM
TOLERÂNCIA A DÉFICIT HÍDRICO**

Santa Maria, RS
2022

José Eduardo Minussi Winck

**LACUNAS DE PRODUTIVIDADE EM SOJA NO RIO GRANDE DO SUL E
CARACTERIZAÇÃO FISIOLÓGICA DE GENÓTIPOS COM TOLERÂNCIA A DÉFICIT
HÍDRICO**

Tese apresentada ao curso de Doutorado em
Agronomia, da Universidade Federal de
Santa Maria (UFSM, RS), como requisito
parcial para obtenção do título de Doutor em
Agronomia

Orientador: Prof. Dr. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS
2022

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

Winck, José Eduardo Minussi

LACUNAS DE PRODUTIVIDADE EM SOJA NO RIO GRANDE DO SUL
E CARACTERIZAÇÃO FISIOLÓGICA DE GENÓTIPOS COM TOLERÂNCIA A
DÉFICIT HÍDRICO / José Eduardo Minussi Winck.- 2022.
98 p.; 30 cm

Orientador: Nereu Augusto Streck

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Agronomia, RS, 2022

1. Soja 2. Glycine Max (L) Merr 3. Crop model 4.
Manejo 5. Déficit hídrico I. Streck, Nereu Augusto II.
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, JOSÉ EDUARDO MINUSSI WINCK, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) 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.

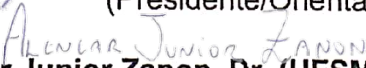
José Eduardo Minussi Winck

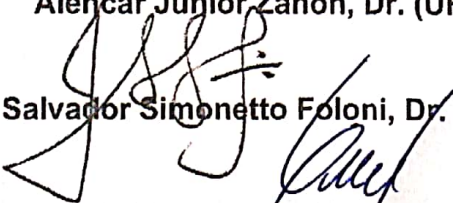
**LACUNAS DE PRODUTIVIDADE EM SOJA NO RIO GRANDE DO SUL E
CARACTERIZAÇÃO FISIOLÓGICA DE GENÓTIPOS COM TOLERÂNCIA A DÉFICIT
HÍDRICO**

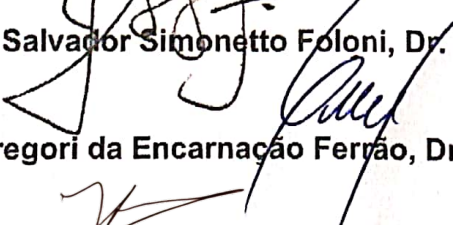
Tese apresentada ao curso de Doutorado em
Agronomia, da Universidade Federal de
Santa Maria (UFSM, RS), como requisito
parcial para obtenção do título de Doutor em
Agronomia

Aprovada em 25 de abril de 2022


Nereu Augusto Streck, PhD (UFSM)
(Presidente/Orientador)


Alencar Junior Zanon, Dr. (UFSM) - Videoconferência


José Salvador Simonetto Foloni, Dr. (EMBRAPA) - Videoconferência


Gregori da Encarnação Ferrão, Dr. (UFMA) - Videoconferência


Juan Pablo Monzon, Dr. (UNMDP/AR) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

À Deus por me proporcionar saúde e persistência;

À toda minha família e namorada pelo apoio incondicional, compreensão, amor, carinho, mas principalmente, por acreditar e investir tempo e dedicação à minha educação, sendo indiretamente a principal responsável por essa tese.

Aos exemplos que tive, em especial a meu avô José Leocyr Dornelles Minussi (*in memoriam*);

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela oportunidade de realizar o doutorado;

Ao professor Nereu Augusto Streck e Alencar Junior Zanon, que desde a iniciação científica em 2010 são peças-chaves para minha formação como profissional, como pesquisador, extensionista e principalmente, como ser humano.

À Equipe FieldCrops pela oportunidade de fazer a diferença, pelo apoio prestado, trabalho em equipe, e amizades fortalecidas durante o doutorado;

À Crops Team, empresa do qual me orgulho em fazer parte.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes, pela concessão da bolsa de estudos (processo nº 88882.427639/2019-01);

RESUMO

LACUNAS DE PRODUTIVIDADE EM SOJA NO RIO GRANDE DO SUL E CARACTERIZAÇÃO FISIOLÓGICA DE GENÓTIPOS COM TOLERÂNCIA A DÉFICIT HÍDRICO

Autor: José Eduardo Minussi Winck
Orientador: PhD. Nereu Augusto Streck

A produtividade média de soja do Rio Grande do Sul (RS) é de 50% do potencial de produtividade, sendo o principal limitante a deficiência hídrica. As estimativas das lacunas de produtividade fornecem importantes informações sobre a possibilidade de aumentar a produção através de melhoras nos sistemas agrícolas. Além disso, novas tecnologias para tolerância a seca vêm ao mercado com a promessa de mitigar as perdas de produtividade pela deficiência hídrica. Neste sentido, os objetivos deste trabalho são: i) decompor os fatores responsáveis pela lacuna de produtividade da soja no RS identificando oportunidades de melhorias no manejo das lavouras, e ii) determinar a resposta da transpiração ao conteúdo de água no solo, representado pela fração de água transpirável no solo (FATS), em soja com fator de transcrição (FT) HaHB4® e FT AtAREB. Os potenciais de produtividade foram estimados com o modelo CSM CROPGRO - Soybean. As lacunas de produtividade das lavouras de soja e a análise das possíveis causas foram estimadas com base nos dados obtidos através de 853 questionários aplicados em quatro anos agrícolas (2017/18, 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021) no RS. Os experimentos de FATS foram instalados em casas de vegetação na EMBRAPA Soja em Londrina/PR e na Tropical Melhoramento e Genética – TMG em Cambé/PR. No experimento em Cambé/PR, foram utilizados quatro cultivares de soja (2 cultivares comerciais e 2 linhagens de soja HB4®), no experimento de Londrina/PR foram utilizados seis cultivares de soja (2 linhagens AtAREB e 4 cultivares comerciais). O incremento anual de produtividade de soja no RS depende de melhorias no manejo (46%), melhoramento genético (42%) e mudanças do clima (12%). Identificamos uma lacuna de 995,3 kg ha⁻¹, 2006,2 kg ha⁻¹ e 1436,5 kg ha⁻¹ referente ao posicionamento de cultivares e épocas de semeadura, a disponibilidade de água durante o ciclo e melhorias de manejo, respectivamente. Uma lacuna de 2432 kg ha⁻¹ pode ser fechada com ajustes de manejo como escolha de cultivar, data de semeadura, pH do solo, teores de P e K no solo, plantio direto, rotação e sucessão de culturas. As linhagens com FT AtAREB1 apresentam transpiração diária reduzida, nos ambientes irrigado e sequeiro, em relação às cultivares comerciais. A maior tolerância à seca das linhagens com FT AtAREB1 deve-se à menor FATS crítica para taxa de transpiração, maior razão raiz/parte aérea e sobrevivência mais longa sob seca. A hibridização com cultivares com alto potencial produtivo pode melhorar a tolerância à seca de linhagens de soja com FT AtAREB. A linhagem HaHB4® com maior tolerância a seca mantém a transpiração potencial em valores baixos de FATS e possui eficiência no uso da água 14% maior que a cultivar sensível sob déficit hídrico. Em condições bem irrigadas, os genótipos HaHB4® apresentaram os maiores valores de coeficiente de transpiração, o que indica processos fisiológicos com bom funcionamento. Este estudo indica que cultivares de soja com FT AtAREB1 ou FT HaHB4® podem ser alternativas para aumentar a tolerância da soja ao déficit hídrico em regiões com seca.

Palavras-chave: *Glycine Max* (L) Merr.; crop model, manejo, déficit hídrico, FATS.

ABSTRACT

YIELD GAPS IN SOYBEAN IN RIO GRANDE DO SUL AND PHYSIOLOGICAL CHARACTERIZATION IN GENOTYPES WITH WATER DEFICIT TOLERANCE

Author: José Eduardo Minussi Winck

Advisor: PhD. Nereu Augusto Streck

The average soybean yield in Rio Grande do Sul (RS) is 50% of yield potential, being the main limiting factor water deficit. Estimates of yield gaps provide important information about the possibility of increasing production through improvements in agricultural systems. In addition, new technologies for drought tolerance come to the market with the promise of mitigating productivity losses due to water deficit. In this sense, the objectives of this work are: i) to decompose the factors responsible for the soybean yield gap in RS, identifying opportunities for improvements in crop management, and ii) determine the response of transpiration to soil water content, represented by the fraction of transpirable water in the soil (FTSW), in soybean with transcription factor (TF) HaHB4® and TF AtAREB. The yield potentials were estimated with the crop model CSM CROPGRO - Soybean. Yield gaps and the analysis of possible causes were calculated based on those obtained through 853 field soybean data applied in four agricultural years (2017/18, 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021) in RS. The FTSW experiments were installed in greenhouses at EMBRAPA Soja in Londrina/PR and at Tropical Melhoramento e Genética – TMG in Cambé/PR. In the experiment in Cambé/PR, four soybean cultivars were used (2 commercial cultivars and 2 HB4® soybean lines), and in the Londrina/PR experiment six soybean cultivars were used (2 AtAREB lines and 4 commercial cultivars). The annual increase in yield of changes in RS depends on management methods (46%), genetic improvement (42%) and climate (12%). We identified a gap of 995.3 kg ha⁻¹, 2006.2 kg ha⁻¹ and 1436.5 kg ha⁻¹ regarding the positioning of cultivars and sowing dates, water availability during the cycle and management improvements, respectively. A gap of 2431.7 kg ha⁻¹ can be closed by adjusting cultivar management, sowing date, plant density, soil pH, P and K contents, no-tillage, crop rotation and crop succession. The lines with TF AtAREB1 present reduced daily transpiration, in the irrigated and rainfed environments, in relation to the commercial cultivars. The higher drought tolerance of lines with TF AtAREB1 is due to the lower threshold FTSW for transpiration rate, higher root/shoot ratio and longer drought survival. Hybridization of cultivars with high yield potential can improve soybean drought tolerance with TF AtAREB. The HaHB4® line with higher drought tolerance maintains potential transpiration at low FTSW values and has 14% higher water use efficiency than the sensitive cultivar under water deficit. Under well-irrigated conditions, HaHB4® gene showed higher transpiration coefficient values, that indicate physiological processes with good functioning. This study indicates that soybean cultivars with TF AtAREB1 or TF HaHB4® may be an alternative to increase soybean tolerance to water deficit in regions with drought.

Key-words: *Glycine Max* (L) Merr.; crop model, crop management, water deficit, FTSW.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Mapa do Rio Grande do Sul com a localização das lavouras do banco de dados (a) e produtividade média de soja derivada do banco de dados versus produtividade média municipal relatado por meio de estatística oficial (IBGE) no estado do Rio Grande do Sul em quatro safras (2017/18, 2018/19, 2019/20).....	29
Figura 2 -	Conceitos e definições dos níveis de produtividade e lacunas de produtividade usadas neste estudo para decompor a lacuna de produtividade da soja no Sul do Brasil.....	30
Figura 3 -	Produtividade média do RS segundo estatísticas oficiais de 2004/05 a 2020/21 (a), ganho genético estimado pelas produtividades do banco de dados e ano de lançamento das cultivares (b), potencial de produtividade médio estimado o modelo CSM-CROPGRO-Soybean para o RS de 2004/05 a 2020/21 (c) e contribuição dos fatores (manejo, melhoramento genético e ambiente) para o incremento anual de produtividade do RS (d).....	33
Figura 4 -	Potencial de produtividade estimados e produtividade dos agricultores do banco de dados (a) e decomposição da lacuna de produtividade dos agricultores do banco de dados (b).....	34
Figura 5 -	Produtividade em relação ao grupo de maturação relativa (GMR) (a), produtividade em relação a data de semeadura em dia juliano (b) e análise de probabilidade para produtividade de 3000 kg ha ⁻¹ (linha vermelha) em função da data de semeadura (c).....	37
Figura 6 -	Produtividade em relação a densidade de plantas (a) e análise de probabilidade para produtividade de 3000 kg ha ⁻¹ (linha vermelha) em função da densidade de plantas (b).....	38
Figura 7 -	Relação entre produtividade e as variáveis de solo: pH (a), teor de P (b), teor de K (c), teor de S (d), matéria orgânica (MO) (e), adubação com P ₂ O ₅ (f), adubação com K ₂ O em cobertura (g) e adubação com K ₂ O total (h).....	40
Figura 8 -	Relação entre produtividade e eficiência do uso do K (EUK) (a), pH do solo e EUK (b), produtividade e eficiência do uso do P (EUP) (c) e pH do solo e EUP (d).....	42
Figura 9 -	Comparação entre lavouras entre métodos de preparo do solo (a), sistemas de rotação de culturas (b) e sucessão de culturas (c).....	44
Figura 10 -	Minimum and maximum temperatures and vapor pressure deficit during the experiment.....	52

Figura 11 -	Accumulated transpiration in plants without water deficit (a), with water deficit (b), difference in accumulated transpiration between irrigated and non-irrigated pots (c), accumulated leaf area in plants without water deficit (d), with deficit water (e) and leaf area difference between irrigated and non-irrigated pots (f).....	58
Figura 12 -	Leaf transpiration rate (LRT) as a function of the fraction of transpirable soil water (FTSW) for soybean genotypes BS IRGA 1642 IPRO (a), TMG 7063 IPRO (b), BR16 (c), BMX Desafio RR (d), AtAREB1 1Ea2939 (Background BR16) (e) and AtAREB1 BRT18-0280 (BR16 x 1Ea2939 Areb) (f).....	59
Figura 13 -	Photosynthetic rate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) for soybean genotypes BS IRGA 1642 IPRO, TMG 7063 IPRO, BR16, BMX Desafio RR, AtAREB1 1Ea2939 (Background BR16) and AtAREB1 BRT18-0280 (BR16 x AtAREB1 1Ea2939) with water supply (WS) and water deficit (WD), on the 1st, 10th, 12th, 13th and 14th days after the beginning of the experiment.....	61
Figura 14 -	Total dry matter (a), shoot biomass (b), root biomass (c), root/shoot ratio (d) and water use efficiency (WUE) (e) for dry biomass accumulation of soybean genotypes cultivated without deficit (WS) and with water deficit (WD).....	62
Figura 15 -	Soybean plants at 15 days after water suppression. From left to right: BR16, 1Ea2939, BRT18-0280 and BMX Desafio RR.....	63
Figura 16 -	Temperature and vapor pressure deficit (A) and relative humidity and photoperiod (B) during experiment.....	76
Figura 17 -	Water use efficiency (WUE) for dry matter accumulation (A) and transpiration coefficient (TC) (B) of soybean genotypes grown without deficit (SW) and with water deficit (WD).....	80
Figura 18 -	Normalized relative transpiration (NRT) as a function of fraction of transpirable soil water (FTSW) for soybean genotypes TMG 7063 IPRO (A), BS IRGA 1542 IPRO (B), TS18-6-610108 (C), and TS18-6-610084 (D).....	81
Figura 19 -	Pontos a melhorar nas lavouras de soja do RS, percepção de 426 produtores de soja na safra 2020/2021.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Comparação de práticas de manejo e insumos aplicados entre os tercis mais altos (AP) e os tercis mais baixos (BP) em 853 lavouras de soja no RS, Brasil.....	35
Tabela 2 -	Dry matter accumulation of leaf, stem, root, and total per soybean plant of four genotypes in treatments without deficit (T1) and with water deficit (T2).....	78
Tabela 3 -	Total transpiration and mean daily transpiration of soybean genotypes without deficit (T1) and with water deficit (T2).....	79

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	A CULTURA DA SOJA.....	15
2.2	POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE.....	17
2.3	LACUNAS DE PRODUTIVIDADE.....	19
2.4	MITIGAÇÃO DO ESTRESSE POR DEFICIÊNCIA HÍDRICA.....	20
2.4.1	Quantificação do déficit hídrico.....	22
3	RESULTADOS.....	25
3.1	ARTIGO 1 - DECOMPOSIÇÃO DA LACUNA DE PRODUTIVIDADE DAS LAVOURAS DE SOJA EM AMBIENTE X GENÉTICA X MANEJO NO SUL DO BRASIL.....	25
3.1.1	Introdução.....	26
3.1.2	Material e métodos.....	27
3.1.2.1	Região em estudo	27
3.1.2.2	Dados meteorológicos.....	27
3.1.2.3	Coleta e análise de dados.....	28
3.1.2.4	Definição do potencial de produtividade do RS e das lacunas de produtividade das lavouras de soja.....	29
3.1.2.5	Identificação das causas da lacuna de produtividade.....	31
3.1.3	Resultados e discussão.....	31
3.1.3.1	Incremento de produtividade soja de 2004 a 2021.....	31
3.1.3.2	Potencial de produtividade de soja e decomposição da lacuna de produtividade.....	33

3.1.3.3	Influência dos fatores limitantes para o aumento da produtividade....	34
3.1.3.4	Genótipo x ambiente.....	36
3.1.3.5	Densidade de plantas.....	37
3.1.3.6	Solo.....	38
3.1.3.7	Manejo conservacionista.....	42
3.1.4	Conclusão.....	44
3.1.5	Referências.....	45
3.2	ARTIGO 2 - GROWTH AND PHYSIOLOGY OF SOYBEAN GENOTYPES WITH AtAREB1 TRANSCRIPTION FACTOR TO TOLERATE WATER DEFICIT.....	49
3.2.1	Introduction.....	50
3.2.2	Material and methods.....	51
3.2.2.1	Meteorological conditions and experimental design.....	51
3.2.2.2	Genotypes.....	52
3.2.2.3	Application of water deficit.....	53
3.2.2.4	Evaluations.....	53
3.2.2.5	Normalization of variables.....	55
3.2.3	Results.....	56
3.2.3.1	Transpiration and leaf growth.....	56
3.1.3.2	Gas exchange parameters and biomass accumulation.....	60
3.2.4	Discussion.....	63
3.2.5	References.....	65
3.3	ARTIGO 3 - GROWTH AND TRANSPIRATION OF SOYBEAN GENOTYPES WITH HaHB4® TRANSCRIPTION FACTOR FOR DROUGHT TOLERANCE.....	70

3.3.1	Introduction.....	71
3.3.2	Material and methods.....	72
3.3.2.1	Site and experimental design.....	72
3.3.2.2	Application of water deficit.....	73
3.3.2.3	Normalization of variables.....	75
3.3.2.4	Meteorological variables and statistical analysis.....	76
3.3.3	Results.....	77
3.3.3.1	DM accumulation in water deficit environment.....	77
3.3.3.2	Ecophysiological indicators.....	79
3.3.3.3	Relative transpiration during soil drying.....	80
3.3.4	Discussion.....	82
3.3.5	References.....	84
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	88
5	REFERÊNCIAS.....	91
6	ANEXOS.....	96

1. INTRODUÇÃO

As crescentes taxas de desenvolvimento econômico nos países mais populosos do mundo, o grande aumento na demanda por energia, grãos e produtos animais e a relativa estagnação no aumento das produtividades das principais culturas agrícolas pressionam ainda mais a necessidade de atingirmos maiores produtividades independentemente da cultura (CASSMAN et al, 2003; ROYAL SOCIETY DE LONDRES, 2009; CONAB, 2017). Nesse contexto, a América do Sul (Brasil, Argentina e Paraguai) se destaca pela maior área de cultivo de soja do mundo, com mais de 50 milhões de hectares cultivados anualmente (FAO, 2022). Devido ao elevado preço de mercado, a soja destaca-se, no Brasil, entre as demais culturas em área cultivada e rentabilidade, sendo importante conhecer e quantificar as produtividades potenciais da soja na Região Sul do Brasil, as lacunas entre o que está sendo produzido e as causas dessas perdas.

A produtividade de uma lavoura é a integralização dos fatores que definem o potencial de produtividade (CO_2 , radiação solar, temperatura, genótipo) conforme a disponibilidade dos fatores que limitam (água, nutrientes, população de plantas) e a eficiência no controle dos fatores que reduzem o potencial de produtividade (RONG et al., 2021). No Sul do Brasil, algumas práticas culturais como a utilização de cultivares precoces (grupo de maturação menor que 6.4) e tipo de crescimento indeterminado, semeaduras antecipadas (ZANON; STRECK; GRASSINI, 2016), a incorporação de tecnologias genéticas na cultura e a rotação de culturas são alguns dos fatores que proporcionaram um incremento da produtividade nacional, chegando a média regional na safra 2020/2021 de 3528 kg ha^{-1} (CONAB, 2021). Porém essa produtividade está abaixo da alcançada em lavouras de alto nível tecnológico, que alcançou na safra 2020/2021 7800 kg ha^{-1} (Ribeiro et al., 2021), sugerindo a existência de uma lacuna de produtividade já identificada por Tagliapietra et al (2021).

A influência dos fatores limitantes para o aumento da produtividade da soja pode ser melhor compreendida se o potencial de produtividade for conhecido, possibilitando dimensionar as perdas por estresses que afetam a cultura. As estimativas dos potenciais de produtividade e as possíveis explicações da lacuna de produtividade são fundamentais para direcionar esforços e investimentos para aumentar a eficiência no uso

dos recursos dos sistemas agrícolas (DEVKOTA et al., 2015). No Sul do Brasil, por exemplo, o déficit hídrico, é o principal limitante da produtividade de soja (SENTELHAS et al., 2015; ZANON; STRECK; GRASSINI, 2016), porém, os benefícios esperados para a maioria das demais práticas de manejo ainda são desconhecidos. Esses fatores são todos influenciados pela heterogeneidade biofísica e socioeconômica associada à diferentes ambientes de produção (BEDDOW et al., 2015).

Em algumas regiões do Brasil, o cultivo de soja é arriscado em função do baixo índice pluviométrico, má distribuição das chuvas e baixa capacidade de armazenamento de água dos solos. Na região Sul, por exemplo, em anos de La Niña o déficit hídrico geralmente se agrava em toda a região subtropical podendo apresentar um considerável impacto negativo nas lavouras bem como nas economias locais. Diante disso, há a necessidade de estudar formas de mitigação da resposta da soja a deficiência hídrica, sendo uma delas a incorporação de genes a genótipos superiores que expressam maior tolerância a déficit hídrico, como a tecnologia HB4® e a incorporação de fatores de transcrição de ligação a elementos responsivos ao ácido abscísico (AREB). Essas tecnologias entram no mercado brasileiro como alternativa de maior tolerância ao déficit hídrico, porém, a resposta destas transgenias à deficiência hídrica comparada às cultivares comumente utilizadas pelos produtores no Sul do Brasil ainda não é conhecida.

É necessário que pesquisadores, extensionistas, consultores e produtores atuem conjuntamente de modo a identificar razões que possam colaborar para expressar a produtividade da soja em todo o seu potencial (CONAB, 2017), o que constitui a motivação para este estudo. Neste sentido, o objetivo deste projeto é decompor os fatores responsáveis pela lacuna de produtividade da soja no Rio Grande do Sul e determinar a resposta do crescimento e transpiração ao conteúdo de água no solo, representado pela fração de água transpirável no solo em soja com novas transgenias para tolerância à seca.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A CULTURA DA SOJA

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma planta dicotiledônea, originária da China, pertencente à família Fabaceae, que contém na sua composição aproximadamente 20% de óleo e 35% de proteína. O alto valor nutritivo do grão fez com que a soja se tornasse a principal oleaginosa consumida e produzida no mundo, sendo o quarto grão mais cultivado no mundo.

Os principais países produtores são Brasil (1º lugar), Estados Unidos (2º lugar), Argentina (3º lugar), totalizando 123 milhões de hectares cultivados pela *commodity*. A América do Sul abrange aproximadamente 50% da área de soja mundial, sendo a maior extensão territorial contínua de produção de soja. O maior consumo do grão é da China (30% da produção mundial), demanda essa suprida pelas exportações brasileiras (80 milhões de toneladas) e americanas. A crescente demanda por proteína e óleo vegetal fez com que no Brasil a soja se tornasse o cultivo com maior taxa de expansão territorial e produção das últimas quatro décadas, sendo responsável por 25% do PIB do agronegócio nacional.

A cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merr.) atualmente é o principal *commodity* agrícola do Brasil. A cultura se tornou economicamente importante no Brasil a partir da década de 1970 e desde então, houve um incremento na produção de soja no Brasil de 1160% e na área produzida de 581%, entre as safras 1976/1977 e 2020/2021. As características edafoclimáticas do Brasil, aliado às biotecnologias, melhoramento genético e manejo cultural fez com que a produtividade do Brasil aumentasse 204% em 40 anos. A área cultivada atualmente no Brasil é de 38,9 milhões de hectares, com uma produção de 135,1 milhões de toneladas na safra 2020/2021 (CONAB, 2022), consumidos na forma de ração animal, óleo, biocombustíveis e alimentação humana. Os principais estados produtores são Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul e Goiás.

As altas taxas de aumento de produtividade estão pressionadas pelas crescentes taxas de desenvolvimento econômico nos países mais populosos do mundo, o grande aumento na demanda por energia, grãos e produtos animais e a alta rentabilidade do

cultivo da soja. A crescente demanda de produção de soja deve atingir 690 milhões toneladas em 2050 (atualmente a produção mundial é de 350 milhões de toneladas), que serão supridos pelos principais países produtores de soja (GAZZONI; DALL'AGNOL, 2018). O aumento da produção pelo aumento da extensão de áreas de cultivo causa prejuízos sociais e ambientais, sendo necessário o aumento da produtividade do cultivo de modo a aumentar a produção com sustentabilidade, sem prejuízos ambientais, com rentabilidade ao produtor e com geração de empregos à sociedade.

Os altos custos de produção aliados a intempéries climáticas, dificultam ou limitam os investimentos na lavoura de soja. As margens do produtor se ajustam a cada safra (CONAB, 2017), tornando necessário a profissionalização do produtor rural visando a maximização dos lucros, que pode ser obtida pelo aumento de produtividade, venda da produção com preços mais altos ou diminuição dos custos, ou interação entre estes fatores.

O aumento da produtividade é a alternativa mais viável para aumentar a quantidade produzida e conseqüentemente a lucratividade, porém é necessário se determinar qual produtividade máxima é atingível e quais os pontos-chaves de investimentos que são economicamente viáveis para os produtores. A otimização no uso de insumos é mais aplicada a lavouras de concursos de produtividade (como o Desafio Nacional de Máxima Produtividade de Soja, realizado pelo CESB) ou experimentos, enquanto que a sua difusão para lavouras comerciais ainda depende da viabilidade econômica do sistema produtivo. A literatura, no entanto, carece de estudos que associem recomendações técnicas ao custo benefício proporcionado pela atividade agrícola, visando a intensificação do sistema produtivo e a assertividade dos investimentos na lavoura.

A viabilidade dos investimentos na lavoura de soja ocorre quando há a adaptação dos genótipos de soja em diferentes condições de cultivo. Desta forma, a premissa de maior importância é otimizar a produtividade do cultivo fazendo coincidir seus estágios fenológicos críticos com as condições ambientais mais favoráveis, minimizando a ocorrência de períodos de estresses nos estágios mais vulneráveis (ZANON; STRECK; GRASSINI et al., 2016). A influência dos fatores limitantes para o aumento da produtividade da soja pode ser melhor compreendida se o potencial de rendimento for

conhecido, possibilitando dimensionar as perdas por erros de manejo ou estresses que afetam a cultura. Através desses estudos, práticas de manejo sítio-específico (ajustadas para a especificidade de cada região) poderão ser propostas com vistas a diminuir a lacuna de produtividade existente nas lavouras.

2.2 POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE

A produtividade é otimizada no ponto em que uma quantidade ótima de fatores de produção é utilizada para uma determinada quantidade fixa de área plantada (PINHO; VASCONCELOS, 2001) e é afetada por fatores diretos (manejo, genética e ambiente) e indiretos (fatores socioeconômicos). O potencial de produtividade pode ser definido como a produtividade de uma cultivar quando cultivada em ambientes aos quais ela é adaptada, com nutrientes e água não-limitantes e com pragas, doenças, ervas daninhas, hospedeiros e outras tensões efetivamente controladas (EVANS; FISCHER, 1999). Os fatores que determinam o potencial de produtividade de uma cultura são a radiação solar interceptada pelo dossel, temperatura, CO₂ atmosférico e características genéticas (VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997).

O potencial de produtividade é restrito ao local de estudo por causa do clima, mas em teoria não depende de propriedades do solo, assumindo que a disponibilidade necessária de água e nutrientes pode ser manejada, o que não é prático ou economicamente viável em casos onde o solo apresenta restrições, como barreiras físicas para o aprofundamento radicular. Assim, em áreas onde o solo não apresenta restrições para a cultura a produtividade pode ser utilizado como potencial de produtividade (VAN ITTERSUM et al., 2013). Portanto, experimentos de campo, lavouras cultivadas sob condições ideais ou modelos matemáticos mecanísticos com *inputs* das variáveis meteorológicas são metodologias adequadas para a determinação do potencial de produtividade (STRECK et al., 2013; VAN ITTERSUM et al., 2013; GRASSINI et al., 2015).

Os modelos dinâmicos mecanísticos têm a capacidade de descrever os processos ecofisiológicos da planta através das interações entre as variáveis ambientais (STRECK et al., 2013). Já, em experimentos, ocorre a utilização de todos os elementos essenciais

para o cultivo potencial, como água, fertilizantes e defensivos, de forma ilimitada, sendo aplicados com todo o cuidado e precisão, de forma praticamente individualizada, de acordo com a característica de cada parcela da área cultivada.

A nível de lavoura, constantemente encontra-se patamares de produtividades acima de 6000 kg ha⁻¹ na Região Sul do Brasil. No Brasil, o Desafio Nacional de Máxima Produtividade de Soja, realizado pelo Comitê Estratégico Soja Brasil (CESB, 2021) e o Soybean Money Maker (RIBEIRO et al., 2021) são concursos de produtividades em que níveis de produtividades elevados são obtidos. O objetivo dos concursos de produtividade máxima é determinar a produtividade potencial da soja e incentivar o desenvolvimento de práticas de cultivo inovadoras, que possibilitem extrair o potencial máximo da cultura, com sustentabilidade e lucratividade (CESB, 2021). Portanto, a obtenção desses níveis de produtividade indica que existe um 'gap' de produtividade da soja que limita a produção de algumas lavouras da Região Sul do Brasil.

Entretanto, atualmente, a otimização de todos os componentes e variáveis de um sistema produtivo de soja se mantém restrita ao contexto dos experimentos e concursos de produtividade máxima e sua difusão para o ambiente produtivo depende ainda da viabilidade econômica e da difusão do modelo de forma economicamente rentável (CONAB, 2017). Além disso, a oscilação da produtividade média e a lacuna da produtividade na Região Sul do Brasil se deve em grande parte à ocorrência de restrições hídricas (SENTELHAS et al., 2015).

O potencial de produtividade limitada por água (PPA) é semelhante ao potencial de produtividade, a diferença é que a produtividade também é influenciada pela disponibilidade hídrica no período de cultivo, características inerentes do genótipo, profundidade de enraizamento e características do solo (capacidade de retenção de água, textura do solo, densidade do solo e inclinação do campo e do cultivo) (VAN ITTERSUM et al., 2013; FAO & DWFI, 2015). Em condições onde a realidade da maior parte dos produtores compreende alguma exceção às condições ideais de manejo e data de semeadura deve-se levar em consideração essas modificações para a determinação dos potenciais de produtividade (VAN ITTERSUM et al., 2013), como é o caso da Região Sul do Brasil.

2.3 LACUNAS DE PRODUTIVIDADE

A diferença da produtividade média de uma cultura, em um local específico, para o potencial de produtividade da mesma cultura no mesmo local, pode ser definida como lacuna de produtividade (DEVKOTA et al., 2015). A identificação das causas destas lacunas pode auxiliar na obtenção de lavouras com maiores produtividades e lucratividade. A influência dos fatores limitantes para o aumento da produtividade da soja pode ser melhor compreendida se o potencial de produtividade for conhecido, possibilitando dimensionar a influência dos fatores de manejo, genética e ambiente que afetam a cultura.

Os estudos sobre as lacunas de produtividade na cultura da soja são recentes, sendo a plataforma Global Yield Gap Atlas (www.yieldgap.org) o pioneiro neste estudo e responsável por reunir todos os estudos relacionados a '*Yield Gap*' no mundo. Grassini et al. (2015) estimou uma lacuna de produtividade de 20 e 30% do potencial da soja em Nebraska, para soja irrigada e de sequeiro, respectivamente. DiMauro et al. (2018), em um estudo semelhante, quantificou uma lacuna de produtividade limitada por água de 30% na soja de sequeiro na Argentina Central, sendo o manejo responsável por 65,5% (49,6% pela data de semeadura) e 90% (51,8% com uso de fungicidas) da lacuna de produtividade em soja safra e safrinha respectivamente.

No Brasil, Sentelhas et al. (2015) iniciaram os estudos com lacunas de produtividade da soja, e quantificaram uma lacuna de 1600 kg ha⁻¹ determinada pela deficiência hídrica, e 500 kg ha⁻¹ determinado pelo manejo cultural. Porém, a densidade de locais amostrados no Brasil é baixa (apenas 17 locais em todo território nacional e apenas um local no Rio Grande do Sul), e o potencial de produtividade foi calculado por um modelo agrometeorológico simples da FAO e para uma faixa de grupo de maturação entre 6 e 7, e os dados observados de produtividade média foram da base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Segundo Grassini et al. (2015) o uso de dados autorreferidos pelo produtor pode ser usado para detectar o impacto de fatores individuais se o conjunto de dados consistir em um grande número de lavouras e anos agrícolas. Através destes relatórios pode-se estimar com segurança usando ferramentas estatísticas conhecidas, a diferença de

rendimento entre as várias práticas de gerenciamento (aspectos socioeconômicos) e as interações dessas práticas com variáveis de manejo e do clima (DEVKOTA et al., 2015). Isto é útil para identificar casos em que os efeitos de fator simples fornecem uma indicação dos principais fatores limitantes no sistema de cultivo, que, por sua vez, podem ser testados em experimentos de campo mais detalhados para confirmar experimentalmente as causas da lacuna de produtividade e testar interações de alta ordem entre fatores (GRASSINI et al., 2015).

Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, este tema ainda é incipiente e as lacunas de produtividade em países em desenvolvimento é, teoricamente, muito maior que nos países desenvolvidos devido ao nível tecnológico das lavouras ser mais baixo em função do custo dos insumos de produção (FAO e DWFI, 2015). E, sabendo que as lacunas de produtividade são dependentes do potencial produtivo da cultura na região e da produtividade média dos produtores, este tema deve ser estudado de forma regionalizada, para que se identifique regiões ou sistemas de produção onde a prioridade mais alta deve ser dada para aumentar produtividade (VAN OORT et al., 2017).

As perspectivas para a produtividade da soja no futuro dependem de uma mudança no atual equilíbrio produtivo que se estabeleceu em âmbito estadual, nacional e mundial (CONAB, 2017). De acordo com a Teoria da Produção, a produtividade média só é otimizada à medida que, para uma determinada área plantada, uma quantidade ótima de todos os fatores produtivos é aplicada, de acordo com o nível tecnológico e técnicas produtivas difundidas no mercado (ARBAGE, 2012). Portanto, o grande desafio é atingir maiores níveis de produtividade aliando a implementação tecnológica com a viabilidade econômica e aplicabilidade comercial.

2.4 MITIGAÇÃO DO ESTRESSE POR DEFICIÊNCIA HÍDRICA

Um progresso considerável no estado da arte tem procurado quantificar as lacunas de produção em ambientes irrigados e limitados por água (GRASSINI; CASSMAN, 2012; PASUQUIN et al., 2014), mas os esforços para suprimir essas lacunas são ou ausentes ou incompletos para a maioria das regiões, como na Região Sul do Brasil (DEVKOTA, et al., 2015). Recentemente, surgiram estudos para seleções de

linhagens e de cultivares como forma de mitigar os prejuízos ocasionados pelas estiagens na cultura da soja, como análises da arquitetura radicular (PRINCE et al.; 2017), índice de sensibilidade ao déficit hídrico de um modelo calibrado para classificar cultivares de alta e normal tolerância à seca (BATTISTI; SENTELHAS, 2014) e índices de tolerância ao estresse, ranking e análise de agrupamentos de cultivares de soja (CHOWDHURY et al., 2018). Porém, os resultados destes trabalhos são limitados a poucas cultivares comerciais e restrito a algumas faixas de grupo de maturação.

Nesse contexto, a EMBRAPA Soja surge com novos eventos transgênicos em soja. Estes eventos, gerados através de biolística ou mediada por *Agrobacterium*, superexpressam os fatores de transcrição de ligação a elementos responsivos à desidratação (DREB), de ligação a elementos responsivos a ácido abscísico (ABA) (AREB) e translocação de açúcares (GOLS e NCED) (PAGLIARINI et al., 2017). Vários estudos mostraram promessas de resultados para tolerância à seca (BARBOSA et al., 2013; MARINHO et al., 2016; MARINHO et al., 2019). No entanto, estudos adicionais são necessários em comparação a cultivares comumente utilizadas pelos produtores e para quantificação do ganho genético (PAGLIARINI et al., 2017; ROLLA et al., 2014).

Outra tecnologia genética vem sendo desenvolvido pela Verdeca, com a soja HB4®, que também é um evento transgênico, denominado HB4IND-00410-5, gerado através da transformação mediada por *Agrobacterium* contendo a variante do gene do fator de transcrição HaHB4® do girassol. A expressão do gene HaHB4® reduz a sensibilidade das plantas ao etileno. HaHB4® pertence a uma subclasse de genes HD-Zip I que estão primariamente envolvidos em respostas de estresse abiótico e que ajudam as plantas a tolerar estresses auxiliando no manejo direto e indireto de múltiplos desafios ambientais, incluindo déficit hídrico, exposição salina, respostas de ácido abscísico e etileno, fotossíntese, danos mecânicos e herbivoria. Na planta de girassol nativa, a expressão de HaHB4® é induzida por déficit hídrico, já em plantas de *Arabidopsis* transgênica submetidas ao déficit hídrico, a sobrevivência das plantas após 5 dias de déficit hídrico foi aumentada em mais de 50%.

A introdução desses genes na planta de soja auxiliará os produtores no manejo de períodos de restrição hídrica, o que é muito frequente na Região Sul do Brasil, e agravado em anos de La Niña. Porém, estudos que quantifiquem o nível da deficiência

hídrica que as plantas de soja com estas tecnologias toleram são inexistentes no Brasil, além disso, carecem estudos comparativos da tolerância a estresse hídrico destas novas tecnologias com cultivares já semeadas no sul do Brasil.

2.4.1 Quantificação do déficit hídrico

A água tem um papel fundamental na vida das plantas, sendo o componente mais abundante, representando entre 80 e 95% da massa de tecidos vegetais em crescimento, além disso, somente em torno de 5 a 10% da água absorvida permanece nos tecidos da planta e os 95% restantes são perdidos para a atmosfera via transpiração. A água tem funções como reagente no metabolismo vegetal, arrefecimento, transporte de solutos, crescimento celular e condutância estomática. Desta forma, para cada grama de material orgânico produzido por uma planta, são absorvidos pelas raízes, transportados através do corpo da planta até as folhas e perdido para a atmosfera, aproximadamente 500 g de água (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Escassez de água no solo é o fator ambiental que mais limita o crescimento e rendimento das culturas na maior parte do mundo (BOYER, 1982). Zanon; Streck e Grassini (2016) estimaram que a planta de soja produz $9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ de chuva, necessitando de aproximadamente 800 mm de chuva bem distribuídos durante o ciclo. Sentelhas et al. (2015) iniciaram os estudos com lacunas de produtividade da soja, e quantificaram uma lacuna de 1600 kg ha^{-1} determinada pela deficiência hídrica.

No Sul do Brasil, a principal causa de perdas na agricultura é atribuída a variabilidade da precipitação devido ao fenômeno El Niño Oscilação-Sul (ENOS), sendo geralmente anos de El Niño benéficos para a cultura da soja e anos de La Niña caracterizados por precipitações abaixo da normal climatológica (BERLATO; FARENZENA; FONTANA, 2005). A redução do crescimento e as perdas de rendimento das culturas, verificadas em áreas com baixa precipitação, é em grande parte, devido ao fechamento estomático em resposta ao baixo conteúdo de água no solo, diminuindo a entrada de CO_2 com conseqüente redução da fotossíntese (WONG; COWAN; FARQUHAR, 1985; STRECK, 2004). Assim, a produtividade agrícola é fortemente influenciada pela disponibilidade de água no solo e analisar as respostas das plantas e

seus mecanismos de defesa ao déficit hídrico no solo é de grande importância para se potencializar a produtividade. Entretanto, a quantificação do impacto da disponibilidade de água no solo sobre o crescimento e desenvolvimento vegetal tem recebido pouca atenção.

A quantidade de água no solo pode ser expressa por vários parâmetros, como por exemplo, quantidade total de água armazenada (QTA), capacidade de armazenamento de água disponível (CAD), fração de água disponível (FAD) e fração de água transpirável no solo (FATS), e por meio desses índices pode-se determinar o déficit hídrico no solo. Porém, segundo Santos e Carlesso (1998), dentre esses parâmetros, o conceito da FATS parece ser o que mais se aproxima como indicador da quantidade real de água no solo que pode ser extraída pelas plantas para a transpiração. No conceito da FATS, assume-se que o conteúdo de água no solo utilizado pela planta para a transpiração varia entre o conteúdo de água no solo na capacidade de campo, quando a transpiração é máxima, e o conteúdo de água no solo, quando a transpiração da planta é igual a 10 % da máxima (SINCLAIR; LUDLOW, 1986). Segundo Sinclair e Ludlow (1986) a FATS tem sido utilizada para determinar uma imparcial e consistente resposta das plantas ao déficit hídrico ao longo do período de secamento do solo.

Na determinação da FATS, são considerados dois estágios (SINCLAIR; LUDLOW, 1986; MUCHOW; SINCLAIR, 1991; BINDI et al., 2005): o estágio I, quando a água está disponível livremente no solo e a planta não tem deficiência hídrica e sua condutância estomática e transpiração são máximas, ou seja, o conteúdo de água transpirável no solo não limita a condutância estomática e a transpiração; o estágio II, quando a água disponível no solo diminui e a planta diminui sua condutância estomática e transpiração para manter seu balanço hídrico e turgescência celular.

A FATS em que se inicia o fechamento estomático e, conseqüentemente, quando ocorre redução da transpiração das plantas foi determinado para várias espécies agrícolas anuais, como feijão caupi (*Vigna unguiculata*), feijão mungo (*Vigna mungo*) e guandu (*Cajanus cajan*) (SINCLAIR; LUDLOW, 1986), soja (*Glycine max*) (SINCLAIR, 1986), trigo (*Triticum aestivum*) (AMIR; SINCLAIR, 1991), milho (*Zea mays*) (MUCHOW; SINCLAIR, 1991), batata (*Solanum tuberosum*) (WEISZ; KAMINSKI; SMILOWITZ et al., 1994; LAGO et al., 2012; SOUZA et al., 2014); mandioca (PINHEIRO et al., 2014),

frutíferas como a videira (*Vitis vinifera*) (BINDI et al., 2005), e espécies florestais como o eucalipto (*Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*) (MARTINS et al., 2008).

A curva de resposta da transpiração, parâmetros de crescimento e desenvolvimento ao secamento do solo, representado pela FATS, fornecerá subsídios para detectar diferenças genótípicas de resposta ao déficit hídrico no solo em soja com biotecnologias para tolerância à seca.

3. RESULTADOS

3.1 ARTIGO 1 - DECOMPOSIÇÃO DA LACUNA DE PRODUTIVIDADE DAS LAVOURAS DE SOJA EM AMBIENTE X GENÉTICA X MANEJO NO SUL DO BRASIL - *(será submetido ao Agronomy Journal)*

José Eduardo Minussi Winck, Eduardo Lago Tagliapietra, Renan Augusto Schneider, Victória Brittes Inklman, Marcos Dalla Nora, Cristian Savegnago, Leonardo Silva Paula, Michel Rocha da Silva, Alencar Junior Zanon, Nereu Augusto Streck

RESUMO

As estimativas e explicações das lacunas de produtividade possibilitam aumentar a produção das culturas através de melhorias nos sistemas agrícolas e melhor gestão da propriedade. O objetivo deste trabalho foi decompor a lacuna de produtividade da soja em seus constituintes e quantificar a influência dos principais fatores limitantes da produtividade de soja no Rio Grande do Sul, Brasil, através de análises de 853 lavouras de cinco anos agrícolas. O incremento anual de produtividade de soja no RS depende de melhorias no manejo (46%), melhoramento genético (42%) e mudanças do clima (12%). Identificamos uma lacuna de 995,3 kg ha⁻¹ referente ao posicionamento de cultivares e épocas de semeadura, 2006,2 kg ha⁻¹ referente a disponibilidade de água durante o ciclo e 1436.5 kg ha⁻¹ referente a melhorias de manejo. Uma lacuna de 2431,8 kg ha⁻¹ (lacuna genótipo x ambiente e lacuna de manejo) pode ser fechada com ajustes de manejo como escolha de cultivar, data de semeadura, pH do solo, teores de P e K no solo, plantio direto, rotação e sucessão de culturas.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merr.; crop models; potencial de produtividade.

3.1.1 Introdução

A soja é uma cultura estratégica para segurança alimentar mundial pelo seu alto teor de óleo e proteína (Conjin et al., 2018). A favorabilidade das características edafoclimáticas e o alto retorno econômico do cultivo de soja, fez do Brasil o principal produtor mundial do grão, com um crescimento de 257% na produção nos últimos 20 anos. O estado do Rio Grande do Sul (RS), corresponde por aproximadamente 15% da produção nacional e 5% da produção mundial de soja, porém, a produtividade média (3433 kg ha⁻¹ – safra 2020/2021) está muito abaixo do potencial de produtividade de 6000 kg ha⁻¹ relatado em recentes estudos (Zanon et al., 2016; Tagliapietra et al., 2021).

A diferença entre potencial de produtividade e a produtividade obtida em lavouras comerciais pode ser definido como lacunas de produtividade (Devkota et al., 2015). Este assunto tem sido estudado com frequência nos últimos anos para diversas culturas como por exemplo, arroz nos Estados Unidos (Espe et al., 2016), soja no Brasil (Sentelhas et al., 2015; Tagliapietra et al., 2021), trigo na Austrália (Hochman et al., 2016). Porém, as causas dessas lacunas são pouco estudadas para a maioria das regiões, como por exemplo, na Região Sul do Brasil.

Estas estimativas e explicações das lacunas de produtividade fornecem importantes informações sobre a possibilidade de aumentar a produção das culturas através de melhorias nos sistemas agrícolas e melhor gestão da propriedade (Devkota et al., 2015; Silva et al., 2022). O primeiro passo para diminuir a lacuna de produtividade é quantificar seu tamanho e distribuição. A influência dos fatores limitantes para o aumento da produtividade da soja pode ser melhor compreendida se o potencial de produtividade for conhecido, possibilitando dimensionar as perdas por estresses que afetam a cultura.

A decomposição de lacunas de produtividade em seus constituintes é essencial pois raramente os produtores adotam práticas de manejo básicas, como por exemplo, época de semeadura, correção de solo, rotação de culturas, densidade de plantas ideal, etc. Além disso, os fatores que limitam as produtividades podem ter diferentes custos de investimentos, benefícios esperados, níveis de risco e condições favoráveis que facilitam

a adoção, como o nível de integração de mercado da região (SHIFERAW; OKELLO; REDDY, 2009).

Sentelhas et al. (2015) foi a primeira tentativa de determinar o potencial de produtividade e as lacunas de produtividade da soja no Brasil, porém, com baixa representatividade das lavouras, analisando apenas uma lavoura no Rio Grande do Sul. Mais recentemente, Tagliapietra et al. (2021) estimou os potenciais de produtividade e as lacunas de produtividade para o Rio Grande do Sul analisando uma série histórica de 15 anos de dados climáticos e de produtividade utilizando a metodologia proposta pela Global Yield Gap Atlas (www.yieldgap.org), porém sem quantificar a influência das principais práticas de manejo que limitam a produtividade das lavouras de soja.

Desta forma, é necessário dar sequência ao trabalho de Tagliapietra et al. (2021) de modo a identificar razões que possam colaborar para expressar o potencial de produtividade da soja (CONAB, 2017), o que constitui a motivação para este estudo. O objetivo deste trabalho é decompor a lacuna de produtividade da soja em seus constituintes e quantificar a influência dos principais fatores limitantes da produtividade de soja através de análises de lavouras de cinco anos agrícolas.

3.1.2 Material e métodos

3.1.2.1 Região em estudo

A região em estudo é o estado do Rio Grande do Sul, que corresponde a 15.5% da área semeada de soja no Brasil e possui clima do tipo Cf (subtropical úmido). O cultivo de soja no estado abrange uma área de aproximadamente 6,2 milhões de hectares e 120 mil produtores rurais. O estado do Rio Grande do Sul foi dividido em zonas climáticas (ZC), conforme Tagliapietra et al. (2021), para se obter uma maior precisão na estimativa do potencial de produtividade e na lacuna de produtividade. O solo representativo de cada ZC foi obtido em Streck et al (2008).

3.1.2.2 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram coletados nas estações do Instituto Nacional de Meteorologia 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. Foram coletados os dados meteorológicos diários de temperaturas mínima e máxima, radiação solar, velocidade do vento, chuva e umidade relativa de 01/07/2004 a 01/07/2021.

3.1.2.3 Coleta e análise de dados

Foram acompanhadas 853 lavouras de soja durante as safras 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021 (Figura 1). As informações coletadas incluíam dados referentes a localização da lavoura, produtividade (a 13% de umidade), manejo da cultura (cultivar, data de semeadura, GMR, adubação e insumos aplicados) (Anexo 1). As produtividades das lavouras nas safras 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020 foram comparadas com as estatísticas oficiais de produtividades em nível municipal (IBGE, 2021) para avaliar a qualidade dos dados informados pelos agricultores. A safra 2020/21 não compõe esta análise pois ainda não há dados oficiais disponíveis referente a este ano.

A concordância entre as fontes de dados de produtividade foi avaliada pelo cálculo da raiz do erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de variação (CV%) pelas seguintes fórmulas:

$$RMSE = \sqrt{[(Y_{PR} - Y_{IBGE})^2 / n]} \quad (1)$$

e

$$CV = s / X * 100 \quad (2)$$

onde Y_{PR} e Y_{IBGE} são as produtividades de soja do banco de dados e a média de produtividade do município (IBGE, 2021), respectivamente, n é o número de comparações pareadas de produtividades dos municípios, s é o desvio padrão das produtividades e X é a média das produtividades. O RMSE foi calculado como porcentagem (RMSE%) da produtividade média do banco de dados. O RMSE e o CV

foram relativamente pequenos, com o RMSE representando 13% da produtividade média do banco de dados (Figura 2). Essas descobertas indicam que o banco de dados das lavouras retratou bem a média de produtividade e o intervalo entre lavouras no RS.

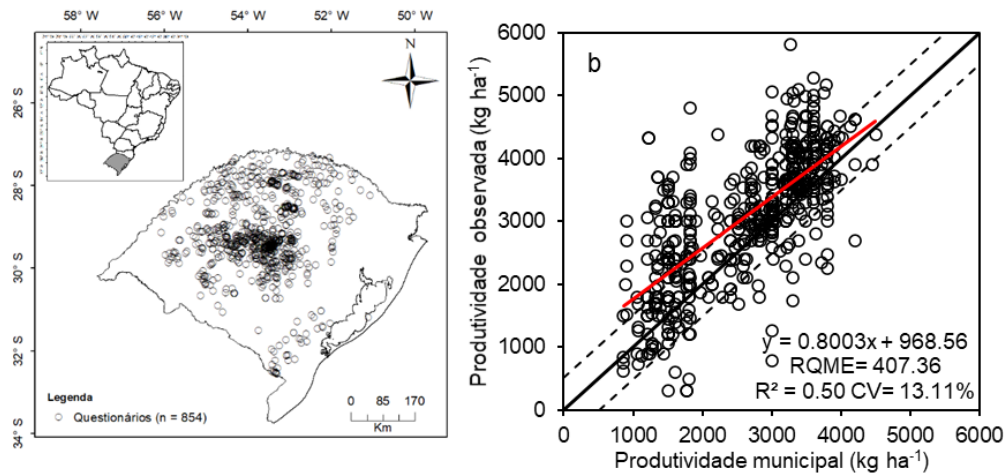


Figura 1. Mapa do Rio Grande do Sul com a localização das lavouras do banco de dados (a) e produtividade média de soja derivada do banco de dados versus produtividade média municipal relatado por meio de estatística oficial (IBGE) no estado do Rio Grande do Sul em quatro safras (2017/18, 2018/19, 2019/20). Cada ponto de dados corresponde a produtividade média para uma determinada combinação município-ano. A linha 1:1 (linha preta contínua), erro quadrático médio (RMSE), o coeficiente de variação (CV%) e número de comparações pareadas (n) também são mostrados.

3.1.2.4 Definição do potencial de produtividade e das lacunas de produtividade das lavouras de soja

Os potenciais de produtividade e os potenciais de produtividade limitados por água foram simulados utilizando o modelo CSM-CROPGRO-Soybean (Boote et al., 2002) em cada ZC's de 2004/2005 a 2020/2021. A validação do modelo para a região em estudo está descrita em Tagliapietra et al. (2021) e Ribas et al. (2021). Os dados de entrada do modelo são as variáveis meteorológicas diárias (descritas no item 3.1.2.2), GMR, data de semeadura e tipo de solo. Foi estimado o aumento do potencial de produtividade e do potencial de produtividade limitado por água para o RS de 2004/2005 a 2020/2021.

Para os anos 2017/2018 a 2020/2021 foram simulados os potenciais de produtividade sem limitação hídrica (PP), os potenciais de produtividade para a data de semeadura e GMR de cada lavoura (PPI) e os potenciais de produtividade limitado por água para a data de semeadura e GMR de cada lavoura (PPIa) (Figura 3). Com os valores de PP, PPI, PPIa e as produtividades das lavouras (Pa) foram calculadas as lacunas de produtividade (Figura 2):

$$Y_{g_{\text{exg}}} = PP - PPI$$

Onde $Y_{g_{\text{exg}}}$ é a lacuna genótipo x ambiente,

$$Y_{g_w} = PPI - PPIa$$

Onde Y_{g_w} é a lacuna de água,

$$Y_{g_m} = PPIa - Pa$$

Onde Y_{g_m} é a lacuna de manejo.

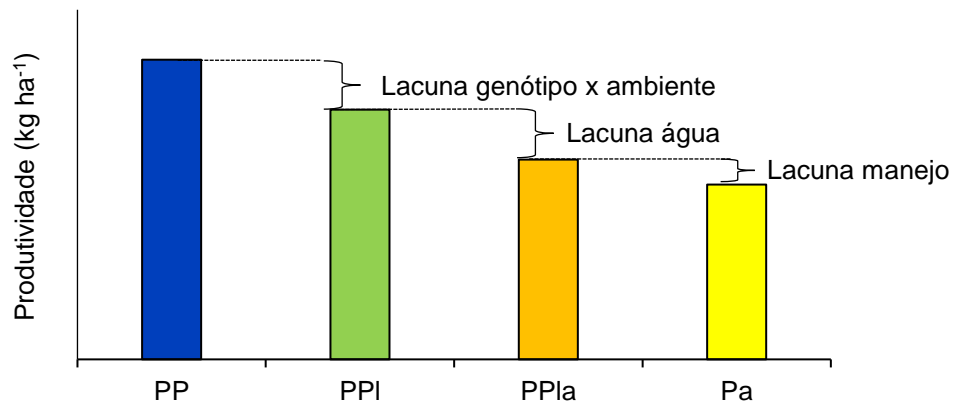


Figura 2. Conceitos e definições dos níveis de produtividade e lacunas de produtividade usadas neste estudo para decompor a lacuna de produtividade da soja no Sul do Brasil. Abreviaturas: PP, potencial de produtividade simulado para data de semeadura ótima e variedade de maior produtividade; PPI, potencial de produtividade simulado para datas de semeadura dos agricultores e variedade dos agricultores; PPIa, potencial de produtividade limitado por água para datas de semeadura dos agricultores e variedade dos agricultores; Pa, produtividades observadas nos campos dos agricultores. PP, PPI e PPIa são simulados utilizando o modelo CSM-CROPGRO-Soybean (Boote et al., 2002).

Foi calculado a média dos potenciais de produtividade e das lacunas das lavouras acompanhadas por ano para definir um valor médio das lacunas de produtividade da soja no RS.

3.1.2.5 Identificação das causas da lacuna de produtividade

As lavouras foram separadas em altas produtividades (AP) (33% superiores) e baixas produtividades (BP) (33% inferiores) (Grassini et al., 2015) através do software Infostat Analysis (Balzarini et al., 2001). As diferenças entre as médias de AP e BP computadas para cada fator (data de semeadura, GMR, parâmetros de solo, etc.) foram avaliadas usando o teste t. A associação entre as classes de AP e BP com outras práticas de manejo como, por exemplo, sistema de semeadura, quantidade de fertilizante aplicado e o número de aplicações de agrotóxicos foi avaliada usando o teste qui-quadrado.

Para quantificar a influência dos fatores quantitativos de manejo no potencial de produtividade foi utilizado a metodologia da boundary function proposta por French e Schultz (1984). Para a relação entre as práticas culturais e o potencial de produtividade, um modelo platô linear (Zanon et al., 2016) foi ajustado para o intervalo das máximas produtividades. Para os fatores qualitativos de manejo as variáveis foram comparadas pelo teste t (dados paramétricos), teste de Wilcoxon (dados não-paramétricos) e teste de Kruskal-Wallis (dados não-paramétricos) para comparações múltiplas de médias.

3.1.3 Resultados

3.1.3.1 Incremento de produtividade da soja de 2005 a 2021 por ambiente x genética x manejo

A produtividade de soja no RS aumentou a uma taxa de 99.3 kg ha⁻¹ ano entre os anos de 2005 a 2021 (CONAB, 2022) (Figura 3a). O aumento da produtividade pode ser atribuído ao desenvolvimento de cultivares com maior potencial genético, a modificações no ambiente como resultados das mudanças climáticas ou a melhorias no manejo das

lavouras pelos produtores. Uma regressão foi estimada entre o ano de lançamento das cultivares e a produtividade das lavouras, a partir de informações de 853 lavouras, 4 safras e 86 cultivares registradas entre 2008 a 2019 (Figura 3b).

Identificamos um incremento na produtividade de $41.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ atribuído ao melhoramento genético. Valores próximos de ganho em produtividade pelo melhoramento genético foram encontrados em na Argentina entre 1980 a 2015 (40 kg ha^{-1}) (Felipe; Gerde; Rotundo, 2016). Já no Brasil estudos recentes com baixa representatividade de locais e cultivares não encontraram incrementos de produtividade pelo melhoramento genético (Neto et al., 2021) enquanto que análises mais robustas com dados de 1965 a 2011 relatam ganhos de produtividade de $40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Todeschini et al., 2019; Umbuaranas et al, 2022).

De 2019 a 2022 o Brasil duplicou o número de cultivares registradas no Registro Nacional de Cultivares (2042 cultivares em fevereiro de 2019 e 4038 cultivares em fevereiro de 2022). Isso se deve basicamente ao surgimento de novas empresas de melhoramento no Brasil e de programas com novas biotecnologias (INTACTA2 XTEND®, HB4®, Libert Link®, Enlist® e Conkesta®). Com o lançamento de um número tão grande de cultivares, é provável que o ganho de produtividade pelo melhoramento genético nos próximos anos diminua, pois é possível que a concorrência comercial entre empresas force o lançamento de cultivares com novas biotecnologias e ganhos genéticos menores.

As estimativas do potencial de produtividade para o RS, mostrou um incremento de $12.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Figura 3c). Por diferença entre a taxa anual de aumento da produtividade das lavouras, taxa de aumento da produtividade atribuída ao melhoramento genético e o incremento anual pelo ambiente, estimamos o incremento anual pelas melhorias de manejo na lavoura ($45.3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Sendo assim, a contribuição anual para o aumento da produtividade nos últimos 15 anos é de 42% atribuído ao melhoramento genético, 46% ao manejo e 13% ao ambiente (Figura 3d).

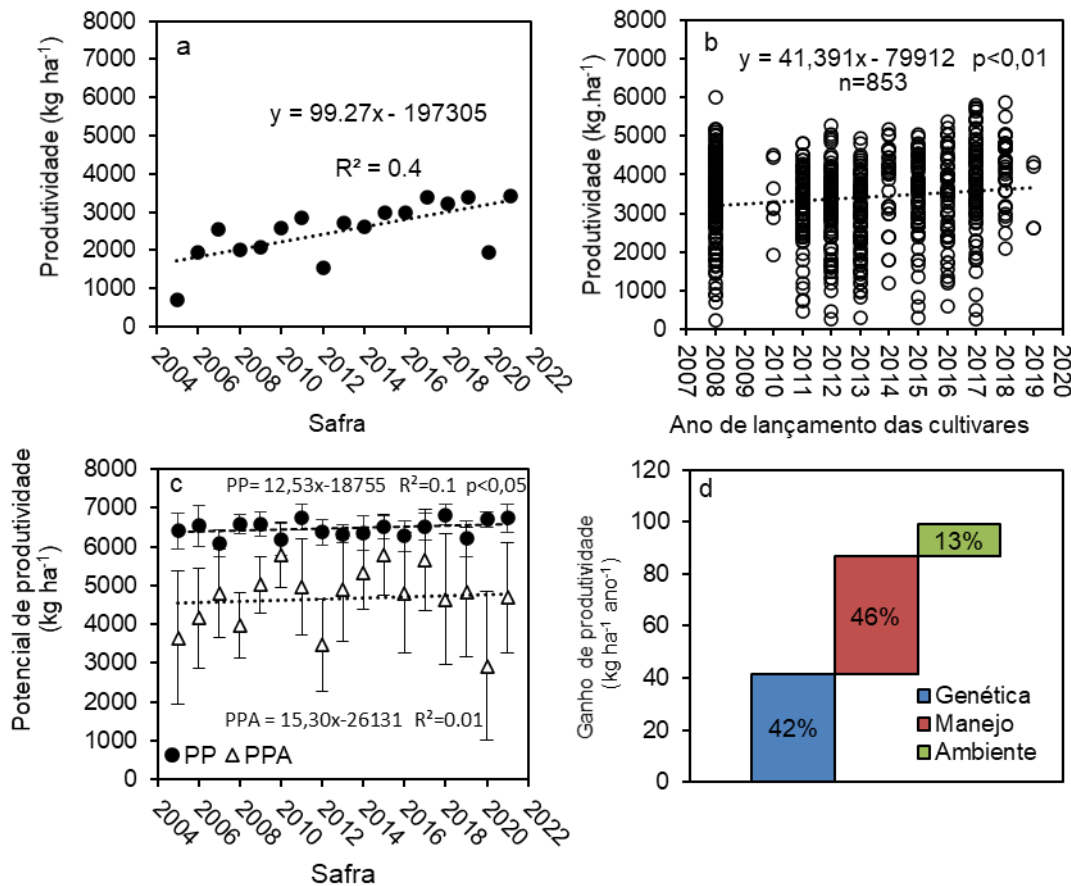


Figura 3. Produtividade média do RS segundo estatísticas oficiais de 2004/05 a 2020/21 (a), ganho genético estimado pelas produtividades do banco de dados e ano de lançamento das cultivares (b), potencial de produtividade (círculos) e potencial de produtividade limitado por água (triângulos) médio estimado pelo modelo CSM-CROPGRO-Soybean para o RS de 2004/05 a 2020/21 (c) e contribuição dos fatores (manejo, melhoramento genético e ambiente) para o incremento anual de produtividade do RS (d).

3.1.3.2 Potencial de produtividade de soja e decomposição da lacuna de produtividade

O potencial de produtividade médio entre as safras 2017/18 a 2020/21 para o RS foi de 7720.3 kg ha⁻¹ (Figura 4a). A diferença entre o PP e a Pa foi de 4438 kg ha⁻¹. A decomposição da lacuna de produtividade apresentou uma contribuição de 22,4% pela interação genótipo x ambiente, 45,2% por déficit hídrico e 32,4% por manejo (Figura 4b). Tagliapietra et al (2021) estimou a lacuna por déficit hídrico de 26 a 62% do PP (1800 a 4100 kg ha⁻¹), enquanto que a lacuna de manejo representa 9 a 39% (600 a 2700 kg ha⁻¹) do potencial de produtividade. Embora os potenciais de produtividade se assemelham

neste trabalho e em Tagliapietra et al (2021), a decomposição da lacuna de produtividade apresenta diferenças metodológicas como a análise dados de lavouras, a decomposição da lacuna de produtividade em mais um fator (LPgxa) e a estimativa da lacuna de água considerando os potenciais estimados para cada lavoura. A análise da decomposição da lacuna de produtividade a nível de lavoura, pode orientar técnicos, produtores e políticas públicas nos esforços a serem dedicados na aplicação de insumos, ajustes de planejamento ou possíveis investimentos em irrigação.

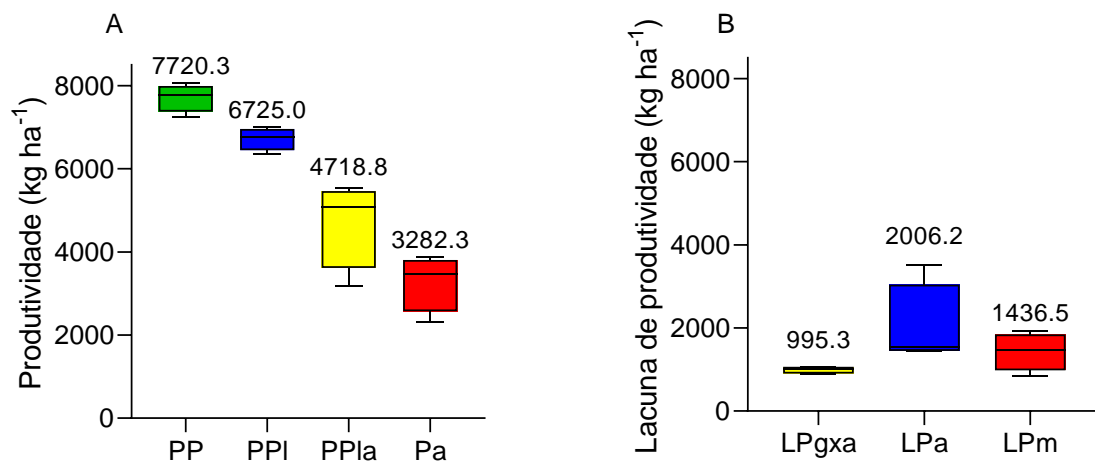


Figura 4. Potenciais de produtividade estimados e produtividade média das lavouras (a) e decomposição da lacuna de produtividade média das lavouras (b) dos anos 2017/18, 2018/19, 2019/20 e 2020/21. PP, potencial de produtividade da soja do RS; PPI, potencial de produtividade das lavouras do banco de dados; PPIa, potencial de produtividade limitado por água das lavouras do banco de dados; Pa, produtividade das lavouras (Pa); LPgxa, lacuna de produtividade referente a genótipo x ambiente, LPa, lacunas de produtividade referente a água; LPm, lacuna de produtividade referente ao manejo.

3.1.3.3 Influência dos fatores limitantes para o aumento da produtividade

As lavouras de alta produtividade tiveram produtividade 96% maior que as lavouras de baixa produtividade. As principais diferenças de manejo entre AP e BP estão relacionadas a interação genótipo x ambiente (data de semeadura e GMR), fertilidade de solo (pH do solo, P, K e S no solo, teor de MO), a nutrição de plantas (adubação de P e K), manejo de doenças, densidade de plantas e práticas de manejo conservacionista do solo (preparo do solo, rotação e sucessão de culturas) (Tabela 1).

Tabela 1. Comparação de práticas de manejo e insumos aplicados entre os tercis mais altos (AP) e os tercis mais baixos (BP) em 853 lavouras de soja no RS, Brasil (Figura 1). Os valores indicam as diferenças médias (AP – BP) entre os tercis de rendimento superior e inferior. As médias são indicadas para cada variável no campo AP e BP. Os asteriscos indicam significância em $p < 0,01^{***}$, $p < 0,05^{**}$ e $p < 0,1^*$.

Variável	Unidade	n	Alta produtividade (AP)	Baixa produtividade (BP)	AP- BP
Produtividade	Kg ha ⁻¹	595	4445.36	2267.60	2177.76 ^{***}
Semeadura	Dia juliano	595	311	319	8 ^{***}
GMR		594	5.7	6	0.3 ^{***}
pH		330	5.6	5.4	0.2 ^{***}
Psolo	Mg dm ⁻³	257	15.46	10.87	4.59 ^{***}
Ksolo	Mg dm ⁻³	269	147.75	114.60	33.15 ^{***}
Ssolo	Mg dm ⁻³	87	14.02	9.27	4.75 ^{***}
MO	%	280	3.02	2.61	0.41 ^{***}
Pbase	Kg ha ⁻¹	529	83.75	72.28	11.47 ^{***}
Kbase	Kg ha ⁻¹	539	44.53	53.33	-8.81
Kcobertura	Kg ha ⁻¹	289	79.23	56.59	21.37 ^{***}
Ktotal	Kg ha ⁻¹	543	93.48	77.96	15.52 ^{***}
Fungicidas	Nº aplicações	568	3.68	2.81	0.87 ^{***}
<i>Densidade de plantas</i>					
<22 pl m ⁻²	%fields	65	45	55	-10
22-31 pl m ⁻²	%fields	287	56	44	12 ^{**}
>31pl m ⁻²	%fields	143	42	58	-4
<i>Preparo do solo</i>					
Direto	%fields	520	57	43	14 ^{***}
Convencional	%fields	63	8	92	-84 ^{***}
<i>Rotação de culturas</i>					
Milho	%fields	58	66	34	32 ^{**}
Soja	%fields	480	52	48	4
<i>Sucessão de culturas</i>					
Aveia	%fields	172	59	41	18 ^{**}
Pousio	%fields	11	45	55	-10
Pastagem	%fields	245	32	68	-36 ^{***}
Trigo	%fields	86	67	33	34 ^{***}
Mix	%fields	33	88	12	76 ^{***}
Ervilhaca	%fields	6	100	0	100

3.1.3.4 Genótipo x ambiente

O valor de GMR 5.6 foi o que alcançou as maiores produtividades (Figura 5a). As máximas produtividades ($5165,00 \text{ kg ha}^{-1}$) foram encontradas em semeaduras até 18/11 (DJ 322) (Figura 5b). O atraso na data de semeadura após 18/11 resultou na perda de produtividade de $44,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. O fator biofísico que explica a perda de produtividade, com a utilização de $\text{GMR} > 5.6$ e data de semeadura posterior a 18/11, é a redução do coeficiente fototermal entre os estágios R3-R7 da soja (Zanon et al., 2016).

A perda de produtividade com o atraso da semeadura em experimentos de soja foi relatada por Zanon et al. (2016) e Tagliapietra et al. (2021) para a região subtropical do Brasil, estes estudos englobam produtividades de experimentos acima de 6 ton ha^{-1} com datas limites diferentes conforme o GMR. Em nossos resultados de lavouras encontramos um platô em semeaduras até 18/11, o que é compreensível à medida que os produtores buscam obter produtividades nas lavouras para atingir a máxima eficiência econômica e que pode não coincidir com o potencial de produtividade. Entretanto, os fatores ambientais que causam a perda do potencial produtivo com o atraso da época de semeadura já estão esclarecidos.

Uma função de probabilidade cumulativa de produtividade foi realizada para três épocas de semeadura (antes de 31/10, 01/11 a 30/11, após 01/12) (Figura 5c). As probabilidades de atingir produtividades abaixo ou acima de 3000 kg ha^{-1} são indicadas por uma linha vertical (tracejada vermelha). A análise de probabilidade mostra 80% de chance de atingir produtividades iguais ou maiores que 3000 kg ha^{-1} em semeaduras até 30/10, enquanto que em semeaduras a partir de 01/12 a probabilidade é de 42%.

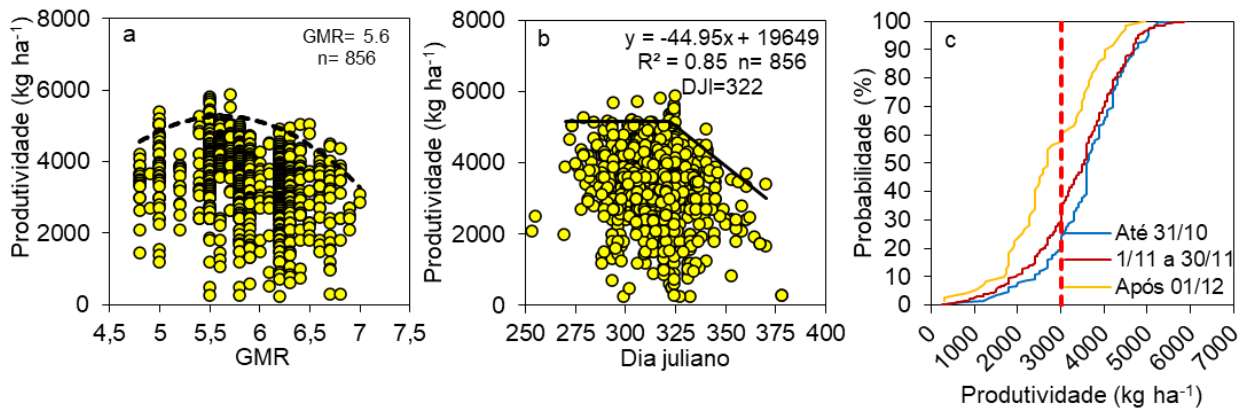


Figura 5. Produtividade em relação a grupo de maturação relativa (GMR) (a), produtividade em relação a data de semeadura em dia juliano (b) e análise de probabilidade para produtividade de 3000 kg ha⁻¹ (linha tracejada vermelha) em função da data de semeadura (c).

3.1.3.5 Densidade de plantas

Um platô nas produtividades foi identificado nas densidades de plantas entre 22 e 31 pl m⁻² (Figura 6a). A função limite permitiu identificar as perdas por falta ou excesso de plantas. A cada planta abaixo da densidade de 22 pl m⁻² há uma redução na produtividade de 186,8 kg ha⁻¹ enquanto que a cada planta em excesso além de 31 pl m⁻² há uma redução na produtividade de 110,1 kg ha⁻¹. A análise de probabilidade identificou maiores chances de obter produtividades iguais ou maiores que 3000 kg ha⁻¹ em densidades entre 22-31 pl m⁻² (78%) comparada as baixas e altas densidades (68%) (Figura 6b).

A determinação de uma faixa de densidade de plantas universal permite aos produtores ajustarem a densidade de plantas conforme o seu ambiente de produção (Corassa et al., 2018; Tagliapietra et al., 2021). Sugerimos a necessidade do maior adensamento de plantas (31 pl m⁻²) em ambientes de produção com histórico de baixa produtividade, pois o crescimento das plantas pode ser restringido pela fertilidade do solo, deficiência hídrica, época de semeadura, falhas de plantio e doenças de solo. Essas restrições geram plantas com crescimento reduzido, baixa capacidade compensatória e produção de grãos concentrada na haste principal permitindo o adensamento de plantas sem risco de acamamento. Já para ambientes com histórico de altas produtividades a densidade ideal é aquela que minimiza a competição intra-específica entre plantas, neste

caso, a densidade de 22 pl m⁻² é adequada por maximizar o aproveitamento de água, nutrientes e luz por planta com economia de sementes. Altas densidades em ambientes de alta produtividade podem resultar em acamamento das plantas ocasionando a senescência de folhas mais velhas induzida pela insuficiência de luz e causando perdas de produtividade (Winck et al., 2020).

Estas informações podem servir de subsídios para produtores ajustarem a densidade de sementes buscando atingir a densidade de plantas ideal para cada lavoura. Tecnologias como a semeadura a taxa variável de sementes vem sendo adotada por alguns produtores, porém ainda há a necessidade de determinar a densidade de sementes considerando um percentual de morte de plantas durante o ciclo da cultura.

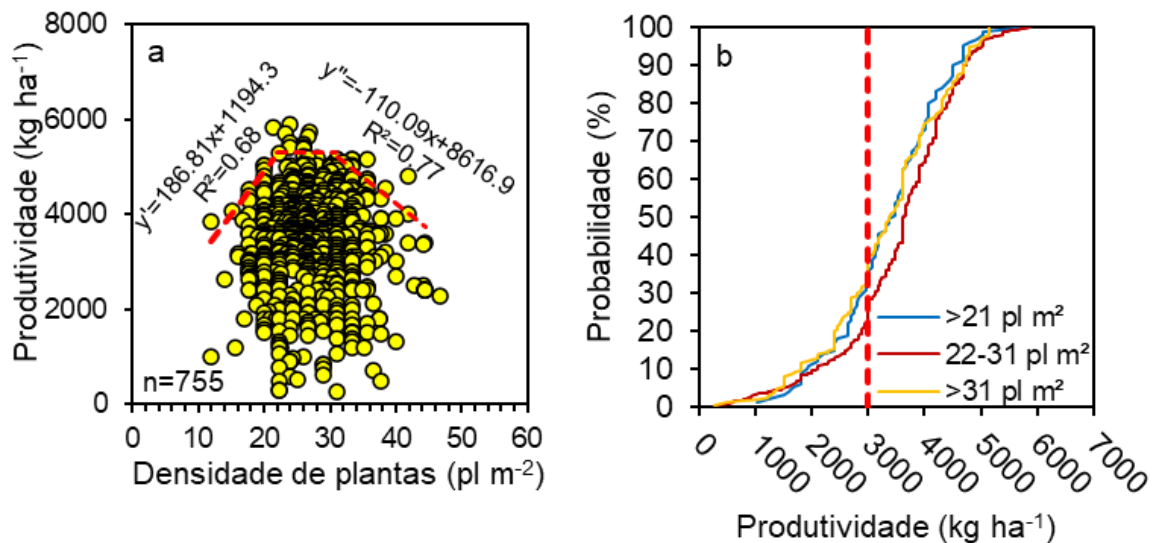


Figura 6. Produtividade em relação a densidade de plantas (a) e análise de probabilidade para produtividade de 3000 kg ha⁻¹ (linha vermelha) em função da densidade de plantas (b).

3.1.3.6 Solo

Relações entre o pH do solo e produtividade indicam uma tendência linear negativa da produtividade com a redução do pH a partir de 5,5 (Figura 7a). A função limite com dados de 512 lavouras apontaram uma perda de produtividade de 150,9 kg ha⁻¹ a cada 0,1 de pH abaixo de 5,5. Os solos tornam-se ácidos quando elementos básicos como Ca, Mg, Na e K contidos pelos colóides do solo são substituídos por íons de hidrogênio. A perda de produtividade pela acidez do solo está associada à

disponibilidade de nutrientes às plantas bem como a toxicidades de Al, H⁺ e Mn (Neina, 2019). Este é o primeiro estudo com uma relação clara entre produtividade de lavouras de soja e acidez do solo.

A função limite para os teores de P, K, S no solo apresentaram uma relação quadrática com a produtividade de soja. O nível crítico para cada nutriente foi de 23,7 mg dm⁻³, 175,2 mg dm⁻³ e 12,2 mg dm⁻³ para P₂O₅, K₂O e S, respectivamente (Figura 7b,c,d). Embora os métodos de recomendação já estejam estabelecidos (Silva et al., 2016) o diagnóstico da fertilidade do solo permite ao produtor ter parâmetros objetivos para otimização de estratégias de fertilização para altos rendimentos e alta eficiência no uso de nutrientes (Rietra et al., 2016).

A fertilidade do solo pode ser melhorada pelo incremento de matéria orgânica no solo (MOS), pelos benefícios na capacidade de reter água e nutrientes, ciclar nutrientes e fornecer estrutura para aeração proporcionando ambiente adequado ao desenvolvimento de associações simbióticas entre microrganismos e a planta. O teor de MOS solos é considerado um componente crítico da intensificação sustentável dos sistemas de produção, porém faltam metas quantitativas preditivas de MOS para objetivos agrícolas e ambientais específicos (Searchinger et al., 2014; Oldfield; Bradford; Wood, 2019).

Nossos resultados demonstram correlação entre MOS e produtividade de soja, com valor ótimo de MOS de 3,3% (Figura 8e). Oldfield; Bradford; Wood (2019) relatam que ganhos no rendimento no milho estabilizaram a uma concentração de aproximadamente 2% de carbono orgânico, o que equivale a aproximadamente 3,5% de MOS. A política mundial de intensificação sustentável apoia amplamente os méritos de aumentar a MOS em terras agrícolas (FAO, 2008; NRCS, 2012). Além dos benefícios citados na melhoria dos solos e na produtividade das culturas, é possível que, num futuro próximo, os produtores sejam remunerados pelo sequestro de carbono quantificado através da MOS. Nosso resultado é um parâmetro quantitativo que pode ser utilizado como meta passível de ser atingida em lavouras para quantificar a intensificação sustentável.

As adubações de P₂O₅ na semeadura e K₂O total apresentaram máxima eficiência técnica com 91,6 e 111,3 kg ha⁻¹, respectivamente (Figura 8f, h). A adubação de K em

cobertura teve a máxima eficiência técnica com 97,4 kg ha⁻¹ (Figura 8g), sugerindo uma adubação na semeadura de 14 kg ha⁻¹ de K₂O, embora a adubação de K₂O na base não tenha apresentado significância estatística entre as lavouras de AP e BP.

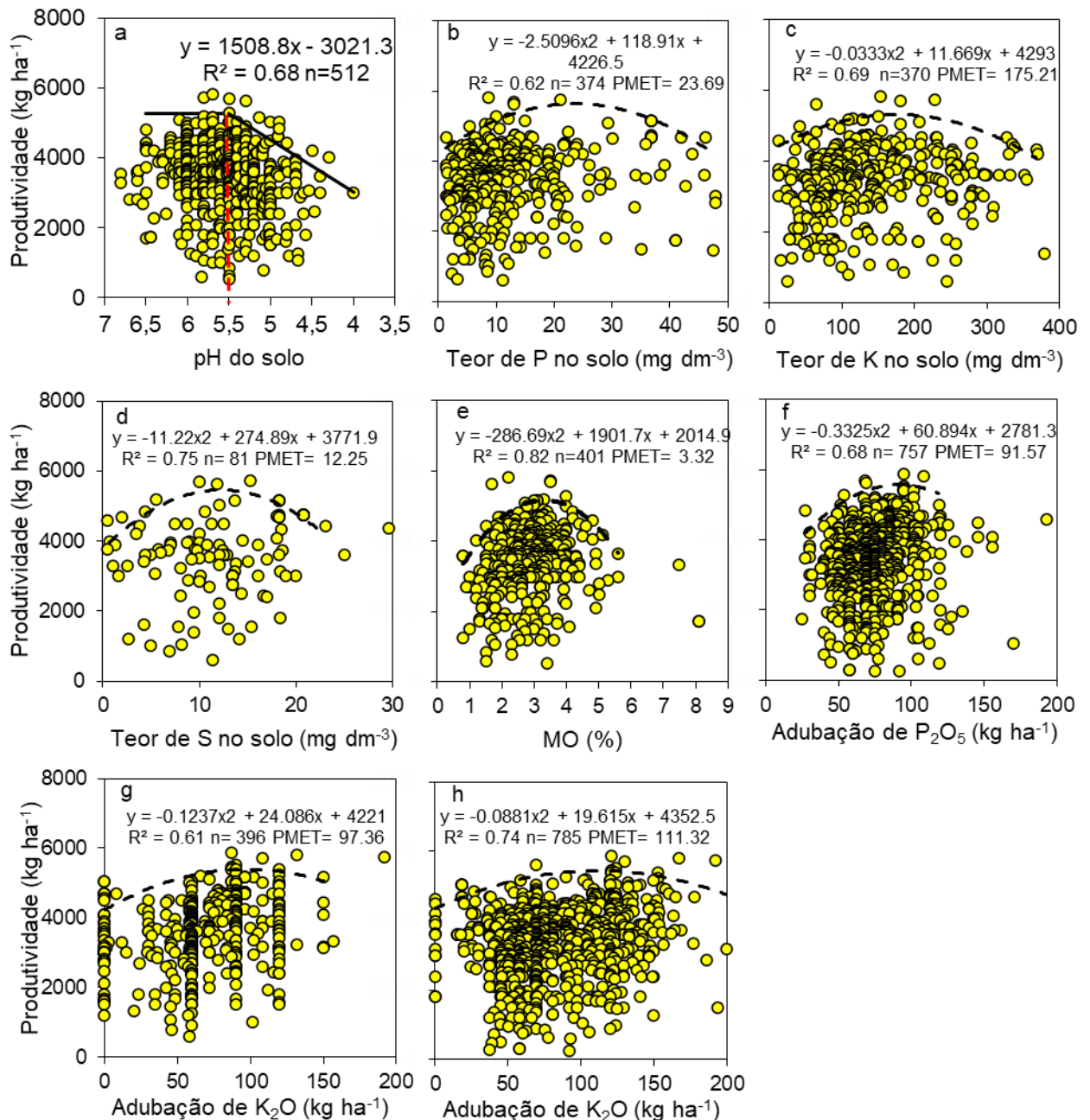


Figura 7. Relação entre produtividade e as variáveis de solo: pH (a), teor de P (b), teor de K (c), teor de S (d), matéria orgânica do solo (MOS) (e), adubação com P₂O₅ (f), adubação com K₂O em cobertura (g) e adubação com K₂O total (h).

Apesar de identificarmos as doses universais de P_2O_5 e K_2O , a adubação ótima é dependente dos teores de nutrientes no solo, pH, capacidade de troca de cátions, teores de argila e saturação de bases. Segundo Li et al. (2019), o pH do solo influencia diretamente na disponibilidade de nutrientes e conseqüentemente na eficiência do uso dos fertilizantes aplicados. Para uma análise coerente, determinamos a relação entre produtividade e eficiência do uso do P_2O_5 (EUP) e K_2O (EUK) (Figura 8a,c), bem como a relação ótima do pH do solo com a EUP e EUK (Figura 8b,d).

A relação linear entre o conjunto de dados de EUK e EUP com a produtividade mostra que, em média, a cada kg de grão de incremento na EUK e EUP a produtividade aumenta 61 kg ha^{-1} para K_2O , enquanto que para P_2O_5 o aumento é de 66 kg ha^{-1} . Porém, altos valores de eficiência do uso dos nutrientes podem estar mais associados com a baixa aplicação de fertilizantes do que com alta produtividade. Para compreender essa relação, as análises das funções limites identificaram o ponto de máxima eficiência técnica da EUK em 45.9 kg kg^{-1} , enquanto que para EUP é de 74.4 kg kg^{-1} .

A eficiência no uso dos nutrientes pode ser melhorada por três formas: (i) selecionar genótipos superiores com maior eficiência de absorção de nutrientes (Neto et al., 2021), (ii) melhorar a utilização do nutriente (Todeschini et al., 2019; Balboa, Sadras, Ciampitti, 2018) e, (iii) melhoria das características químicas, físicas e biológicas dos solos (Li et al., 2019). As plantas melhoradas historicamente aumentaram a eficiência do uso dos nutrientes, principalmente pela melhor partição do nutriente (Balboa, Sadras, Ciampitti, 2018).

A melhoria da produtividade em sistemas de produção com manejo de fertilidade marginal exige uma maior compreensão das necessidades nutricionais da soja ao longo do ciclo, além de estudos de alternativas para aumentar a eficiência do uso dos insumos. Identificamos pela função limite que a correção do pH do solo a 5.5 pode aumentar a EUK e EUP. Um foco nas proporções de nutrientes da planta e suas relações com a taxa de crescimento da cultura também podem contribuir para as recomendações agrônômicas existentes e ajudar a garantir que as necessidades de fertilidade das plantas sejam atendidas com a disponibilidade de nutrientes ao longo da temporada para atingir produtividades acima de 4500 kg ha^{-1} (La Menza et al., 2019; Balboa, Sadras, Ciampitti, 2018).

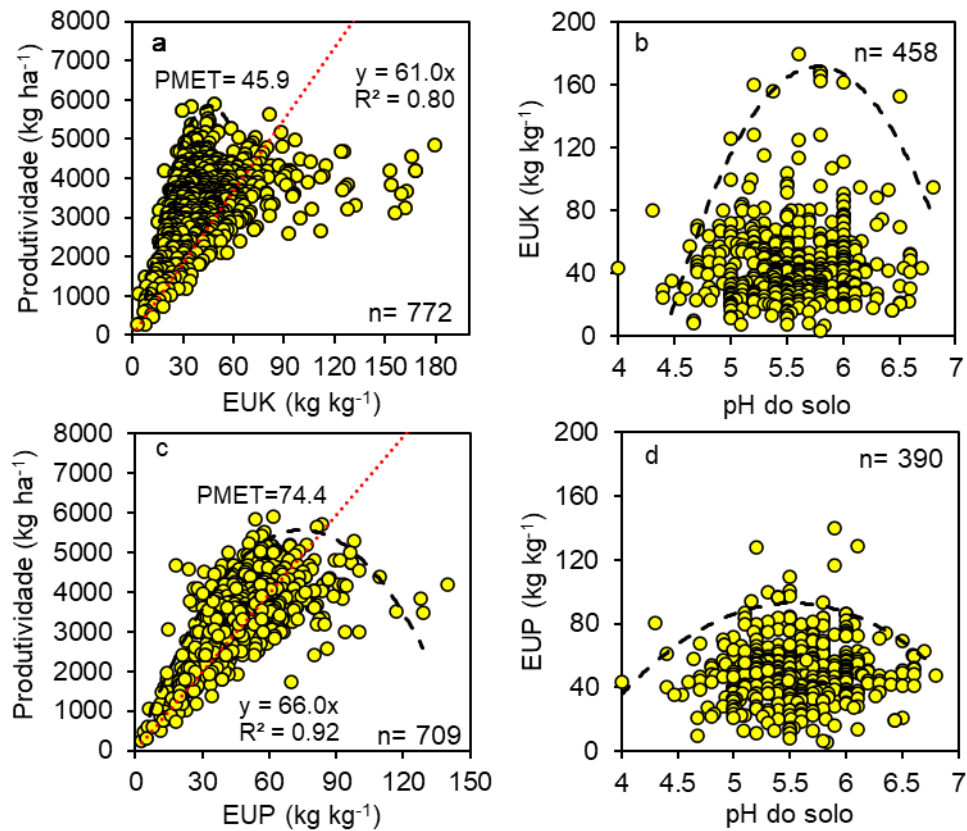


Figura 8. Relação entre produtividade e eficiência do uso do K (EUK) (a), pH do solo e EUK (b), produtividade e eficiência do uso do P (EUP) (c) e pH do solo e EUP (d).

3.1.3.7 Manejo conservacionista

A análise de 764 lavouras indicou que plantio direto apresentou 42% de aumento de produtividade em relação ao plantio convencional (3514,9 vs. 2459,7 kg ha⁻¹) (Figura 9a). Os sistemas de plantio direto e de cobertura podem incrementar matéria orgânica no solo, e melhorar as características físicas, químicas e biológicas do solo (Wulanningtyas et al., 2021).

As lavouras com rotação de cultura com milho apresentaram 14,9% de aumento de produtividade em comparação às lavouras com a monocultura de soja (3887,1 vs. 3401,2 kg ha⁻¹) (Figura 9b). Vários trabalhos relatam os benefícios da rotação de cultura para soja nas características físicas, químicas e biológicas do solo (Haruna; Nkongolo, 2019; Neupane et al., 2021). Nossa análise corrobora com resultados encontrados em outras regiões do mundo como em Missouri, EUA, com ganhos de 9,2% (Houx III;

Wiebold; Fritschi, 2014), Illinois e Monmouth, EUA, com ganhos de 19% (Neupane et al., 2021), bacia do Rio da Plata com ganhos de aproximadamente 10% (Mazzilli; Ernst, 2019), podendo chegar a ganhos de produtividade de até 40% em regiões com problemas de nematóides (Mourtzinis et al., 2017).

A monocultura de soja pode ser problemática devido ao seu impacto negativo na qualidade do solo em comparação com as culturas de cereais (Mazzilli; Ernst, 2019). A soja possui menor produção de palha além de apresentar baixa relação C/N (em relação ao milho), o que promove uma rápida decomposição da palhada, ocasionando maior perda de água por evaporação, perdas de nutrientes por lixiviação e maior temperatura do solo, o que pode prejudicar a atividade microbiológica e explicar os menores rendimentos de soja em monocultivo (Agomoh et al., 2021). Outro benefício da rotação de cultura milho-soja é a capacidade de reduzir as emissões de N_2O (Behnke et al., 2018). Este fato deve passar a ser considerado pelos produtores, visto a crescente pressão de países importadores da soja brasileira em importar um grão produzido com maior sustentabilidade. Porém faltam pesquisas sobre os impactos ambientais da rotação de culturas e metodologias robustas para quantificar o sequestro de gases do efeito estufa pelas lavouras do Brasil.

Apesar de monocultivos apresentarem efeito deletério na produtividade e consequências ambientais negativas, ainda é o sistema de produção mais adotado pelos produtores. Apenas 9% das lavouras acompanhadas fazem rotação com milho (milho-soja). A baixa adoção desta prática provavelmente está associada à falta de evidências dos produtores das perdas de produtividade em soja em monocultivo, baixa vantagem econômica do sistema de rotação e risco climático na introdução do milho no sistema de produção.

Nesse contexto, o uso de culturas de inverno é uma alternativa para minimizar os efeitos da monocultura de soja visando aumentar o nível de matéria orgânica do solo e, com isso, a resiliência dos sistemas agrícolas (Behnke et al., 2018; Agomoh et al., 2021). Os impactos das culturas antecessoras sobre a produtividade da soja foram espécie-específicos. A comparação múltipla das culturas que antecedem a soja mostrou significância na produtividade da soja, sendo em ordem decrescente: Mix de cultivo (4680 kg ha^{-1}) >Ervilhaca (4440 kg ha^{-1}) >Trigo (3780 kg ha^{-1}) >Aveia grão (3660 kg ha^{-1})

1) >Pousio (3780 kg ha⁻¹) >Pastagem de inverno (3200 kg ha⁻¹) (Figura 9c). A maior produtividade das lavouras com mix de cultivo sugerem a hipótese de haver uma sinergia entre a mistura de espécies (gramíneas e leguminosas) para cobertura de solo durante o inverno, conciliando os benefícios de alta produção de palha, fixação de N atmosférico, ciclagem de nutrientes e estruturação de solo. A integração do sistema de plantio direto aliado a rotação e sucessão de culturas são formas de reduzir o impacto ambiental dos cultivos agrícolas, sequestrar carbono atmosférico, aumentar a produção de alimentos e promover estabilidade econômica.

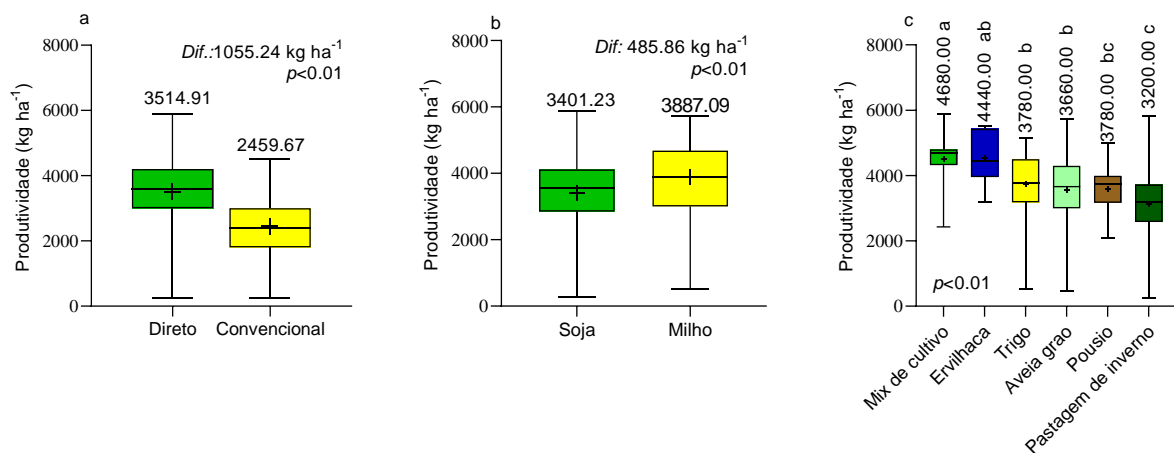


Figura 9. Comparação entre lavouras entre métodos de preparo do solo (a), sistemas de rotação de culturas (b) e sucessão de culturas (c).

3.1.4 Conclusão

O incremento anual de produtividade de soja no RS depende de melhorias no manejo (46%), melhoramento genético (42%) e mudanças do clima (12%). Identificamos uma lacuna de 995,3 kg ha⁻¹ referente ao posicionamento de cultivares e épocas de semeadura, 2006,2 kg ha⁻¹ referente a disponibilidade de água durante o ciclo e 1436,5 kg ha⁻¹ referente a melhorias nas práticas de manejo. Uma lacuna de 2432 kg ha⁻¹ (lacuna genótipo x ambiente e lacuna de manejo) pode ser fechada com ajustes de manejo como escolha de cultivar, data de semeadura, pH do solo, teores de P e K no solo, plantio direto, rotação e sucessão de culturas.

3.1.5 Referências

- AGOMOH, I.V. et al. Crop rotation enhances soybean yields and soil health indicators. *Soil Science Society of America Journal*, v. 85, n. 4, 2021.
- BALBOA, R.G.; SADRAS, V.O.; CIAMPITTI, I.A.. Shifts in Soybean Yield, Nutrient Uptake, and Nutrient Stoichiometry: A Historical Synthesis-Analysis. *Crop Science*, v. 58, n. 1, 2018.
- BALZARINI, M. et al. Software estadístico InfoStat. Manual de usuario, Versión 1, 2001.
- BEHNKE, G.D. et al. Long-term crop rotation and tillage effects on soil greenhouse gas emissions and crop production in Illinois, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 261, 2018.
- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: PEART, R.M.; CURRY, R.B. (Ed.) *Agricultural systems modeling and simulation*. New York: Marcel Dekker, p. 651-691, 1998.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. A produtividade da soja: análise e perspectivas. *Compêndio de estudos Conab*. Brasília: v. 10, 2017.
- CONAB. SÉRIE HISTÓRICA DAS SAFRAS. Companhia Nacional de Abastecimento, disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=30>>, acesso em: 01/02/2022.
- CONJIN, J.G. et al. Can our global food system meet food demand within planetary boundaries? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 251, p. 244–256, 2018.
- CORASSA, G.M. et al. Optimum Soybean Seeding Rates by Yield Environment in Southern Brazil. *Agronomy Journal*, v. 110, p. 1-9, 2018.
- DEVKOTA, K.P. et al. Decomposing maize yield gaps differentiates entry points for intensification in the rainfed mid-hills of Nepal. *Field Crops Research*, v.179, p. 81–94, 2015.
- ESPE, M.B. et al. Yield gap analysis of US rice production systems shows opportunities for improvement. *Field Crops Research*, v.196, p.276–283, 2016.
- FAO: Underpinning conservation agriculture's benefits: the roots of soil health and function. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2008.
- FELIPE, M.; GERDE, J.A.; ROTUNDO, J.L. Soybean Genetic Gain in Maturity Groups III to V in Argentina from 1980 to 2015. *Crop Science*, v. 56, p. 3066–3077, 2016.

FRENCH, R.J.; SCHULTZ, J.E. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean type environment. I. The relation between yield, water use and climate. *Australian Journal Agricultural Research*, v.35, p.743–764, 1984.

GRASSINI, P. et al. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crops Research*, v. 177, p.49-63, 2015.

HARUNA, S. I.; NKONGOLO, N. V. Tillage, Cover Crop and Crop Rotation Effects on Selected Soil Chemical Properties. *Sustainability*, v. 11, 2770, 2019.

HOCHMAN, Z. et al. Data rich yield gap analysis of wheat in Australia. *Field Crops Research*, v. 197, p. 97–106, 2016.

HOUX III, J.H.; WIEBOLD, W.J.; FRITSCHI, F.B.. Rotation and tillage affect soybean grain composition, yield, and nutrient removal. *Field Crops Research*, v. 164, 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618>. Acesso em: 30 jan. 2022.

LA MENZA, N.C. et al. Nitrogen limitation in high-yield soybean: Seed yield, N accumulation, and N-use efficiency. *Field Crops Research*, 237: 74-812019.

LI, Y. et al. Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis. *Journal of Soils and Sediments*, v.19, n.:1393–14062019.

MAZZILLI, S.R.; ERNST, O.R. Soybean Yield Increases When Maize Is Included in the Cropping System. *Agrosystems*, v. 2, n. 1, 2019.

MOURTZINIS, S. et al. Corn and Soybean Yield Response to Tillage, Rotation, and Nematicide Seed Treatment. *Crop Science*, v. 57, n. 3, 2017.

NEINA, D. The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation. *Applied and Environmental Soil Science*, n. 5794869, 2019.

NETO, M.E. et al. Nutrient Removal by Grain in Modern Soybean Varieties. *Frontiers in Plant Science*, v. 12, 615019, 2021.

NEUPANE, A. et al. Long term crop rotation effect on subsequent soybean yield explained by soil and root-associated microbiomes and soil health indicators. *Scientific Reports*, v. 11, 9200, 2021.

NRCS: Farming in the 21st century: a practical approach to improve soil health. USDA, Natural Resources Conservation Service, Washington, 2012.

OLDFIELD, E.E.; BRADFORD, M.A.; WOOD, S.A. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. *Soil*, v. 5, 2019.

RIBAS, G.G. et al. Assessing yield and economic impact of introducing soybean to the lowland rice system in southern Brazil. *Agricultural systems*, v. 188, p. 103036, 2021.

RIETRA, R.P.J.J. et al. Effects of Nutrient Antagonism and Synergism on Yield and Fertilizer Use Efficiency. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 48, n. 16, 2017.

SEARCHINGER, T. et al. Creating a sustainable food future. A menu of solutions to sustainably feed more than 9 billion people by 2050. *World resources report 2013-14 : interim findings*. World Resources Institute, 978-1-56973-817-7, 2014.

SENTELHAS, P.C. et al. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *Journal of Agricultural Science*, v. 153, p. 1394–1411, 2015.

SHIFERAW, B.A.; OKELLO, J.; REDDY, R.V. Adoption and adaptation of natural resource management innovations in smallholder agriculture: reflections on key lessons and best practices. *Environment Development and Sustainability*, v. 11, p. 601–619, 2009.

SILVA, L.S.; GATIBONI, L.C (Org.) *Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*, Vol. 1, 11th edition. Santa Maria: SBCS, p. 376. 2016.

SILVA, J.V. et al. Revisiting yield gaps and the scope for sustainable intensification for irrigated lowland rice in Southeast Asia. *Agricultural Systems*, v. 198, 103383, 2022.

STRECK, E.V. et al. *Solos do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: EMATER/RS – ASCAR, 2008. 222p.

TAGLIAPIETRA, E.L. et al. Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. *Agronomy Journal*, v. 113, p. 1882–1894, 2021.

TODESCHINI, M.H. et al. Soybean genetic progress in South Brazil: physiological, phenological and agronomic traits. *Euphytica*, v. 215, n. 124, 2019.

UMBUARAMAS, R.C et al. Changes in soybean cultivars released over the past 50 years in southern Brazil. *Scientific Reports*, v.12, n. 508, 2022.

WINCK, J.E.M. et al. Spatial arrangement of plants on leaf growth and development and the productive potential of soybean. *Australian Journal of Crop Science (online)*, v. 14, p. 913-922, 2020.

WULANNINGTYASAC, H.S. et al. A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic matter in soybean cultivation. *Soil and Tillage Research* v. 205, 104749, 2021.

ZANON, A.J.; STRECK, N.A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. *Agronomy Journal*, v. 108, n.4, 2016.

3.2 ARTIGO 2 - GROWTH AND PHYSIOLOGY OF SOYBEAN GENOTYPES WITH *AtAREB1* TRANSCRIPTION FACTOR TO TOLERATE WATER DEFICIT - (*submetido a Crop Science*)

José EM Winck¹; Luis FV Sarmiento¹; Jose SS Foloni²; Liliane MM Henning²; Alexandre L Nepomuceno²; Carlos LP Melo²; José RB Farias²; Norman Neumaier²; Alencar J Zanon¹; Nereu A Streck¹

¹ Universidade Federal de Santa Maria, Depto. de Fitotecnia, Av. Roraima, Building 77, CEP 97105-900, Camobi, Santa Maria, RS, Brazil

² Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA Soja, R. Carlos João Strass, s/n, District of Warta, Mailbox 231, CEP 86001-970, Londrina, PR, Brazil.

Core Ideas

- *AtAREB1* transcription factor is an alternative for increase drought tolerance in soybean.
- Genetic improvement can increase the water use efficiency in soybean *AtAREB1*.
- Soybean *AtAREB1* show differential soil water depletion.

ABSTRACT

The use of genetic constructs with *AtAREB1* transcription factors it may be a mechanism for conferring drought tolerance in soybean. The objective of this study was to determine the drought tolerance in soybean genotypes with *AtAREB1* transcription factor and commercial cultivars under water deficit using the fraction of transpirable soil water (FTSW) approach Leaf transpiration rate, leaf growth, dry matter accumulation, gas exchange and water use efficiency (WUE) were evaluated in four commercial cultivars, in the 1Ea2939 strain containing the *AtAREB1* gene and in a strain derived from the introgression of the *AtAREB1* gene in the elite cultivar BMX Desafio RR (BRT18-0280). The lines with TF *AtAREB1* have reduced daily transpiration, in the irrigated and dry environments, compared to commercial cultivars. The higher tolerance to drought of lines with TF *AtAREB1* is due to lower threshold FTSW for transpiration rate, higher root/shoot

ratio and surviving longer period under drought. Hybridization with cultivars with high yield potential can improve the drought tolerance of soybean lines with TF AtAREB1, which is demonstrated by the higher WUE in a drought environment in BRT18-0280 line. This study indicates that soybeans cultivars with TF AtAREB1 can be an alternative to increase soybean tolerance to water deficit in regions with drought.

Key-words: *Glycine max* L., drought, FTSW, abscisic acid, transgenic.

Abbreviations: AREB (ABA-responsive element-binding); TF (transcription factor); FTSW (fraction of transpirable soil water); LRT (leaf rate transpiration); WUE (water use efficiency)

3.2.1 Introduction

Soybean is the most important legume crops in the world due to its high production of vegetable oil and protein (Food and Agriculture Organization, 2021). Forecasts of an increase in global average temperature and the occurrence of long drought spells (Zhao et al., 2017; IPCC, 2021) associated to an increase in the worldwide food demand of more than 70% in the next 30 years (Conjin et al., 2018) leads to the need to study and identify strategies to increase the productive efficiency of soybean, such as, for example, cultivars with greater drought tolerance, in the current agricultural area to ensure food security and environmental sustainability (Nunes et al., 2021). However, for the majority of soybean producers in the world water deficit is the main limiting factor for yield (Grassini et al., 2015; Merlos et al., 2015). In Brazil, the yield gap due to drought can restrict the yield potential in some regions by up to 50% (Sentelhas et al., 2015; Tagliapietra et al., 2021).

Recently, studies of genetic constructs that use transcription factors (TF) as a mechanism to confer drought tolerance in soybean have emerged (Gonzalez et al., 2020; Molinari et al., 2020; Pagliarini et al., 2020; Minussi Winck et al., 2021). These new genetic constructs emerge with the aim of minimizing the impact of water stress on the physiological processes of the soybean plant (Wu et al., 2019). Among the physiological processes affected by drought, the reduction in symbiotic N₂ fixation stands out (Sinclair & Ludlow et al., 1986; Riar et al., 2018), decrease in net photosynthesis (Guo et al., 2018;

Streck, 2004; Pagliarini et al., 2017; Martignago et al., 2020) and reduced growth (Souza et al., 2014; Becker et al., 2021).

The transcription factors bind to specific DNA sequences, activating and regulating the expression of genes that confer drought tolerance (Shinozaki; Yamaguchi-Shinozaki, 2007; Pagliarini et al., 2017). Transcription factors (TF) can mediate drought tolerance by acid abscisic dependent and independent (ABA) pathways. In the ABA-dependent route, studies report that the AREB (*ABA-responsive element-binding*) gene families promote increased tolerance to water deficit (Barbosa et al., 2012). The water deficit occurs with an increase in the levels of ABA that bind to specific receptors, forming enzymatic complexes that bind to AREB1 transcription factors, triggering an expression of genes that action as a defense mechanism. Overexpression of AREB1 transcription factors promotes plant hypersensitivity to ABA, resulting in stomatal closure, slow growth and synthesis of osmoprotective enzymes (Marinho et al., 2015).

Proof-of-concept studies of soybeans with TF AtAREB1 were performed in Brazil to reverse a sensitivity phenotype (Marinho et al., 2015, Pagliarini et al, 2017). The approach of the studies was plant survival, which is often not promising if a tolerant cultivar does not show higher grain yield in the stress environment than a non-tolerant cultivar. However, studies that quantify the physiological changes in transgenic events in relation to soil water content are scarce. In this sense, the objective of this work was to characterize the physiological changes due to the insertion of the AtAREB1 gene through the methodology of transpirable soil water fraction (FTSW) in the original event 1Ea2939 containing the AtAREB1 gene and in a lineage derived from the introgression of this gene in an elite genotype BMX Desafio RR.

3.2.2 Material and methods

3.2.2.1 Meteorological conditions and experimental design

A greenhouse experiment with soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) was conducted in 8-liter pots in Londrina, Paraná Brazil (23°15'01" S, 51°14'59" W) to assess the response of plant physiological processes to soil drying. Meteorological data were

measured daily with thermohygrograph (Hobo® Pro V2). Temperatures ranged from 25.6 to 31.2°C and the vapor pressure deficit ranged from 2.4 to 3.1 kPa (Figure 1).

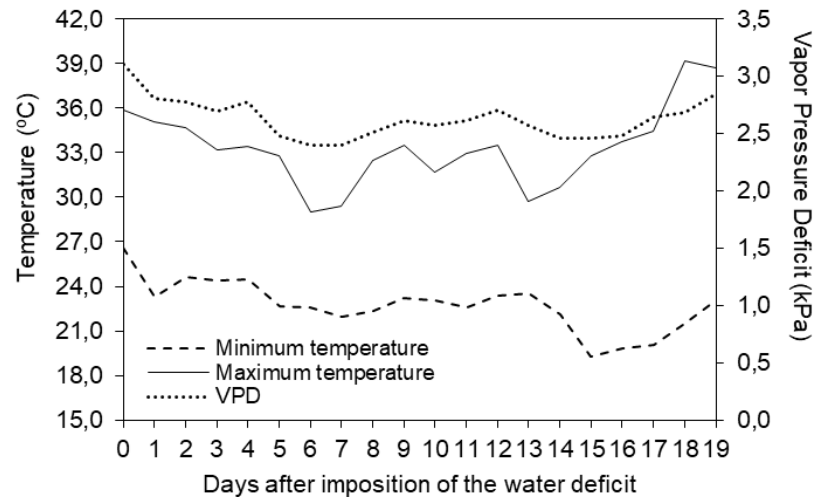


Figure 10. Minimum and maximum temperatures and vapor pressure deficit during the experiment.

The experimental design was completely randomized in a 6x2 factorial scheme as follows: six soybean genotypes (four commercial cultivars and two genotypes with TF AtAREB1) and two soil water conditions (T1- 100% replacement of transpired water and T2- without replacement of transpired water). The experiment was sown on 01/03/2020 and water restriction started on 01/28/2020. Five seeds were sown per pot, inoculated with *Bradyrhizobium* (to form nitrogen-fixing symbioses) and after emergence, thinning was carried out, leaving 1 plant per pot. Seven replicates of each cultivar were used for T1 and 9 replicates for T2.

The soil used in the experiment was from the top layer (from 0 to 20 cm) of a typical Udoxisol with 50% clay with a 33% field capacity. The correction of soil nutrients and acidity was made according to soil analysis and local recommendations for soybean to avoid nutritional limitations and toxicity for the plants (Silva & Gatiboni, 2016).

3.2.2.2 Genotypes

Four commercial cultivars (TMG 7063 IPRO, BS IRGA 1642 IPRO, BMX Desafio RR and BR16) and two genotypes (AtAREB1 1Ea2939 and AtAREB1 BRT18-0280) with AtAREB1 transcription factor were sown. The conventional soybean cultivar BR 16,

considered sensitive to drought (Oya et al. 2004), was transformed via *Agrobacterium tumefaciens* generated by Marinho et al. (2015), as it contains the AREB1 gene (1Ea2939) and generate the 1Ea2939 line, therefore BR16 is a non-transgenic isogenic control. Tests with three independent transgenic events containing the AtAREB1 gene were conducted by Marinho et al. (2015). The event that stood out the most was 1Ea2939, which presented superior performance and higher plant survival rate, even under severe water deficit. Therefore, this event was selected to be introduced in the elite genotype BMX Desafio RR, giving rise to the BRT18-0280 line (AtAREB1 gene). The commercial cultivars (controls) in the experiments were chosen by the criteria of (i) tolerance to water deficit reported by farmers (TMG 7063 IPRO reported as sensitive to water deficit and BS IRGA 1642 IPRO reported as tolerant to water deficit) and (ii) for belonging to breeding programs with different objectives (TMG 7063 IPRO developed for environments with high yield potential and BS IRGA 1642 IPRO developed to have yield stability).

3.2.2.3 Application of water deficit

The period of water stress was 19 days starting at the V6 stage (Fehr & Caviness, 1977). To reach the field capacity of the soil, all pots were saturated and allowed to drain for 24 hours and then the initial mass of each pot was measured. To ensure that the water lost from the soil only occurred due to the transpiration of the plants, the pots were sealed with a plastic film, preventing water loss through evaporation.

The response of soybean plants to water deficit was evaluated by the concept of the fraction of transpirable water in the soil (FTSW) proposed by Sinclair and Ludlow (1986). This method considers two stages of water deficit (Sinclair & Ludlow, 1986), the first stage when the soil water content is reduced, however, the remain water is available and the physiological processes of the plant remain in the potential condition, and the second when the plant presents a reduction in the rate of physiological processes to maintain its water balance and cellular turgor. The critical point for comparisons between genotypes is the volumetric water content in which there are decreases in the physiological processes of plants.

3.2.2.4 Evaluations

The mass of each pot was measured daily on an electronic scale with a capacity of 30 kg and an accuracy of 5 g. The daily transpiration of each plant was obtained by the difference between the pot mass on the specific day and the initial mass (pot mass on the day the water deficit was applied). After weighing, the volume of water transpired from each plant in T1 was replaced in each pot, while the plants in T2 did not receive water.

Leaf area and daily transpiration rate were recorded daily. The area of each leaf (LA) was calculated from the highest length (L) and width (W) of the central leaflet as (Richter et al., 2014):

$$LA = 2.0185 (L \times W) \quad (1)$$

where, LA is the leaf area (cm²), L is the maximum length of the central leaflet (cm) and W is the maximum width of the central leaflet (cm). The total LA of each plant was obtained by the sum of the LA of all individual leaves of the plant.

With the data of daily transpiration and leaf area, the leaf transpiration rate (LRT) was calculated:

$$LRT = \frac{\text{Daily transpiration (mm day}^{-1}\text{)}}{\text{Leaf area of the day (cm}^2\text{)}} \quad (2)$$

The fraction of transpirable soil water (FTSW) was calculated on the equation (Sinclair; Ludlow, 1986):

$$FTSW = \frac{MT2_j - MT2_f}{MT2_i - MT2_f} \quad (3)$$

where MT2 is the mass of each pot in T2 (g per pot), 'j' refers to the day, 'i' indicates MT2 on the starting day of the application of water deficit (beginning of the experiment) and 'f' indicates MT2 on the last day of the experiment.

The experiment was ended and the final mass of the pots was measured when the T2 plants reached 10% of the transpiration of the T1 plants. The 10% limit was imposed by assuming that below this transpiration the stomata are closed and the water loss is due only to epidermal conductance (Sinclair, Ludlow, 1986).

At the beginning of the water restriction and at the end of the experiment, the total dry matter and of each part of plant (root, leaf and stem) were determined. By difference, the accumulation of DM during the experiment was calculated:

$$ADM = DM_f - DM_i \quad (4)$$

where ADM is the accumulated dry mass, DM_f is the final dry mass and DM_i is the initial dry mass.

The water use efficiency (WUE) ($\text{g pl}^{-1} \text{mm}^{-1}$) was also calculated using the equation:

$$WUE = \frac{ADM}{TT} \quad (5)$$

Gas exchange measurements were performed in the 2th, 10th, 12th, 13th and 14th days after the imposition of water restriction. The CO_2 net assimilation variable (photosynthetic rate) was collected in the central leaflet of the third fully expanded trifoliolate leaf (apex-base direction) using a portable infrared gas analyzer (Model LI-6400XT, LiCor) with a 90% blue light + 10% source blue and a 2 cm^2 chamber with photosynthetically active radiation (PAR) parameters of $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and reference CO_2 of $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$.

3.2.2.5 Normalization of variables

The LRT variable was analyzed by a double normalization method to achieve the normalized LRT (NLRT). The first normalization was calculated as the ratio between the T2 values divided by the mean T1 value on each day. The second normalization of each pot was based on the mean ratio of NLRT of T2 during the first days of soil drying, when

the FTSW value was greater than 0.55. This second normalization made values between 0 and 1 and to the data of the variable measured as a function of FTSW, the logistic equation proposed by Sinclair and Ludlow (1986) and Lecoeur and Sinclair (1996) was adjusted.

The NLRT for each pot in T2 were plotted as a function of the fraction of transpirable soil water (FTSW) fed daily. The logistic equation $Y = 1 / (1 + \exp(-a(Xb)))$ was adapted for each gen, where Y is the dependent variable (LRT), X is FTSW and "a" and "b" are empirical coefficients (Sinclair & Ludlow, 1986; Lecouer & Sinclair, 1996), which were estimated by non-linear regression analysis using GraphPad Prism version 8.0.1 software.

The moment when the soil water content affects the NLRT, named the threshold FTSW (FTSWt), was estimated by the logistic equation as the FTSW value when a NLRT are equal to 0.95. Means of qualitative variables were distinguished by the Skott-Knott test when there was significance in the F test ($p < 0.05$).

3.2.3 Results

3.2.3.1 Transpiration and leaf growth

Mean daily transpiration decreased in all genotypes as the number of days under water deficit increased (Figure 2). Water restriction reduced on average 42% the accumulated transpiration compared to plants without deficiency. In T1, the 1Ea2939 line had 13% lower daily average transpiration than its background BR16, while the BRT18-0280 has a similar trend to 1Ea2939 (0.163 l day^{-1} e 0.168 l day^{-1} , respectively). In T2, AREB1 genotypes showed lower daily transpiration (average 0.102 l day^{-1}) surviving drought for 19 days, indicating that the introgression of the AtAREB1 gene promotes greater resistance to water loss through transpiration, which is an important physiological mechanism for drought tolerance. Cultivars BS IRGA 1642 IPRO and TMG7063 IPRO show a high transpiration rate in the irrigated condition (0.210 l.day^{-1} and 0.182 l day^{-1} , respectively) and in rainfed conditions (0.119 l.day^{-1} and 0.110 l day^{-1} , respectively), surviving on average 4 days less under water deficit than genotypes with TF AtAREB1.

The genotypes TMG 7063 IPRO, BS IRGA 1642 IPRO and BR 16 had an increase in the values of Δ transpiration from the 11th day of drought, showing that they had fast closing of the stomata under water deficit (Figure 11). The BMX Desafio RR, 1Ea2939 and BRT18-0280 maintained Δ transpiration values close to zero until the 14th day of stress. This means that these genotypes had less water loss by transpiration and were able to keep their stomata partially open longer to capture CO₂ for photosynthesis.

Cultivars BS IRGA 1642 IPRO and BR16 have the highest daily transpiration rates and, consequently, the highest daily leaf growth (Figure 12). The 1Ea2939 and BRT18-0280 genotypes showed similar behavior in T1. The loss of soil water induced a reduction in leaf area at 12 days of water deficit in the plants on BR16, at 13 days at TMG 7063 IPRO and BS IRGA 1642 IPRO, at 14 days at BMX Desafio RR and 1Ea2939 and at 16 days at BRT18-0280. Line 1Ea2939 showed a gain of 2 days more leaf growth compared to BR16, while BRT18-0280 showed a gain of 2 days more than 1Ea2939.

The NLRT response to soil drying was well described in all cases by a nonlinear regression, with R² higher than 0.80 (Figure 12). At the beginning of the deficit, a LRT of plants under stress remained stable and decreased as the FTSW decreased below a threshold. The genotypes showed the FTSW threshold values for NLRT, ranging from 0.13 to 0.30. The selection of a sensitive (TMG 7063 IPRO) and a tolerant (BS IRGA 1642 IPRO) soybean cultivar for this study was confirmed by estimating the FTSW threshold values for NLRT (Figure 3). Line 1Ea2939 presented FTSW threshold value for NLRT of 0.14 while BR16 0.21 and BRT18-0280 0.15.

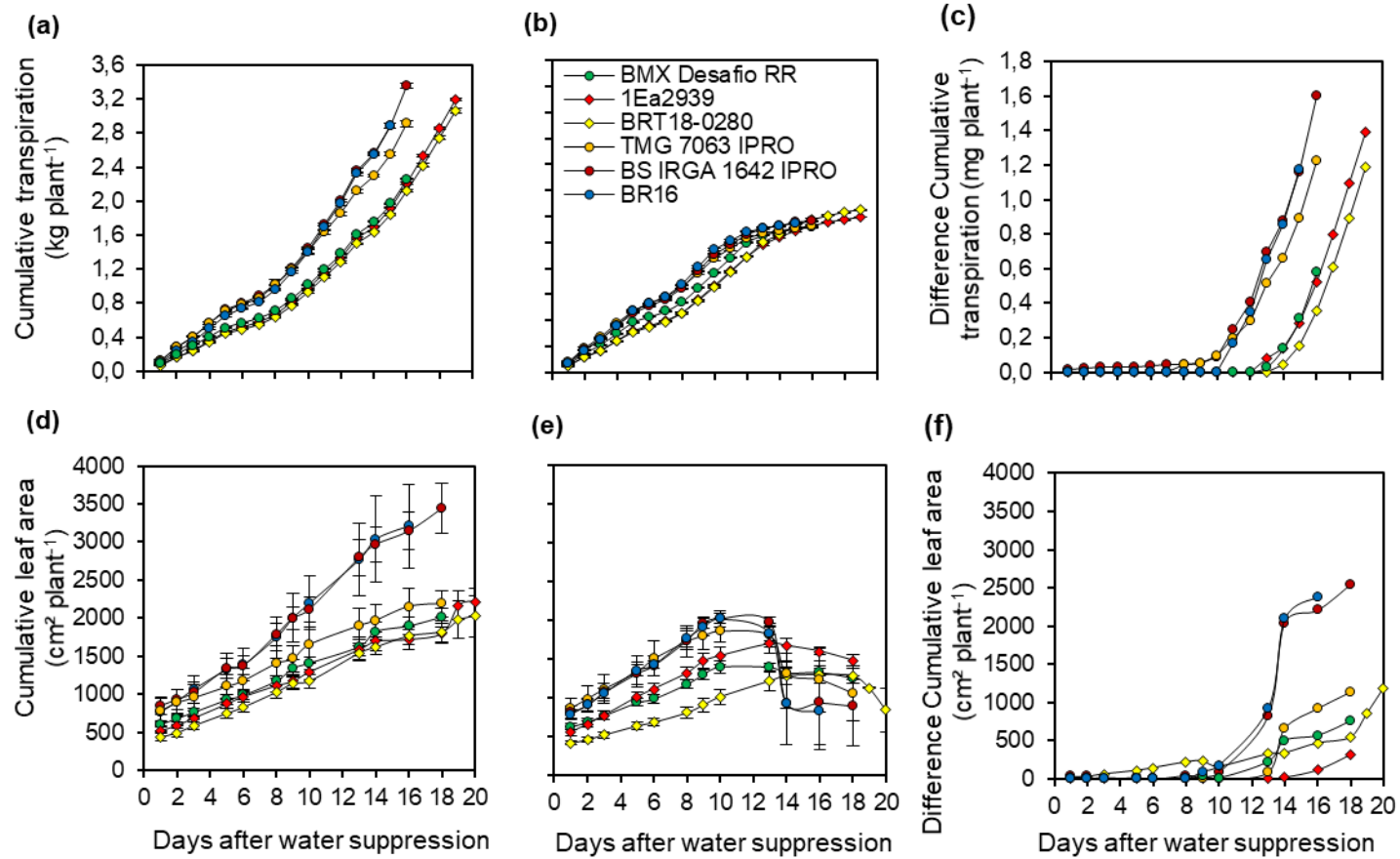


Figure 11. Accumulated transpiration in plants without water deficit (a), with water deficit (b), difference in accumulated transpiration between irrigated and non-irrigated pots (c), accumulated leaf area in plants without water deficit (d), with deficit water (e) and leaf area difference between irrigated and non-irrigated pots (f).

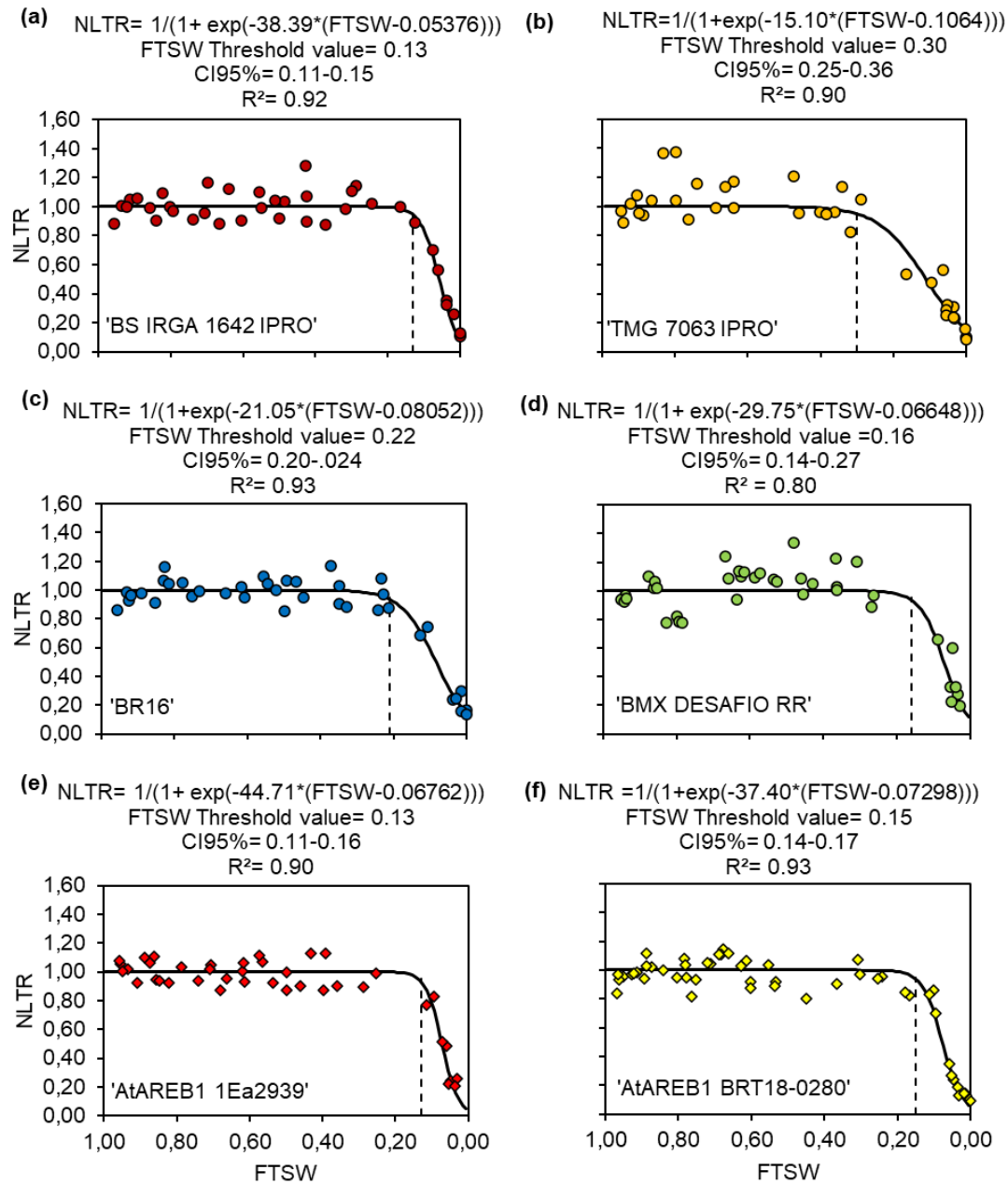


Figure 12. Leaf transpiration rate (LRT) as a function of the fraction of transpirable soil water (FTSW) for soybean genotypes BS IRGA 1642 IPRO (a), TMG 7063 IPRO (b), BR16 (c), BMX Desafio RR (d), AtAREB1 1Ea2939 (Background BR16) (e) and AtAREB1 BRT18-0280 (BR16 x 1Ea2939 Areb) (f). Circles represent commercial cultivars and diamonds represent transgenic genotypes.

3.2.3.2 Gas exchange parameters and biomass accumulation

The photosynthetic rate in T2 reduced in different proportions in all genotypes according to the number of days of water restriction (Figure 13). At two days of water deficit, the photosynthetic rate was similar between T1 and T2 in all genotypes. After 10 days of water restriction, the cultivars BS IRGA 1642 IPRO and BR 16 had the biggest drop in photosynthetic rate, while the other cultivars showed similar values between the T1 and T2 pots. After 12 days of water restriction, the AtAREB1 BRT18-0280 line presented higher photosynthetic rate values than the other genotypes. The AtAREB1 BRT18-0280 line showed 72 and 4623% of the potential photosynthetic rate while its parent lineage AtAREB1 1Ea2939 showed 26 and 8% of the potential photosynthetic at 12 and 13 days of water restriction, respectively.

BS IRGA 1642 IPRO showed the highest accumulation of total DM in T1, in T2 there was no statistical difference between the cultivars. The shoot of the plants was the structure most affected by the water deficit, in T2 there was a 43.1% reduction in DM accumulation compared to T1, while in the roots there was a 22.9% reduction (Figure 14). BS IRGA 1642 IPRO showed the highest accumulation of DM in shoot in T1, but the cultivars did not differ statistically in T2 for DM accumulation in shoot and root (Figure 14). In T1, the AtAREB lines showed higher root DM accumulation values.

The AREB1 genotypes have higher root/shoot ratio, that is, more roots per cm² of leaf, which allows the plant to maintain transpiration rates for longer period (low FTSW threshold value). The introgression of TF AREB1 into BR16 practically did not change the WUE in a drought environment (5.23 and 5.31 g l⁻¹, respectively), as the 1Ea2939 line has reduced growth and transpiration, not changing the WUE. The highest values of WUE under drought were found in the cultivar BMX Desafio RR and in the BRT18-0280 line. The BRT18-0280 line presented a genetic gain in WUE of 8.10% compared to 1Ea2939.

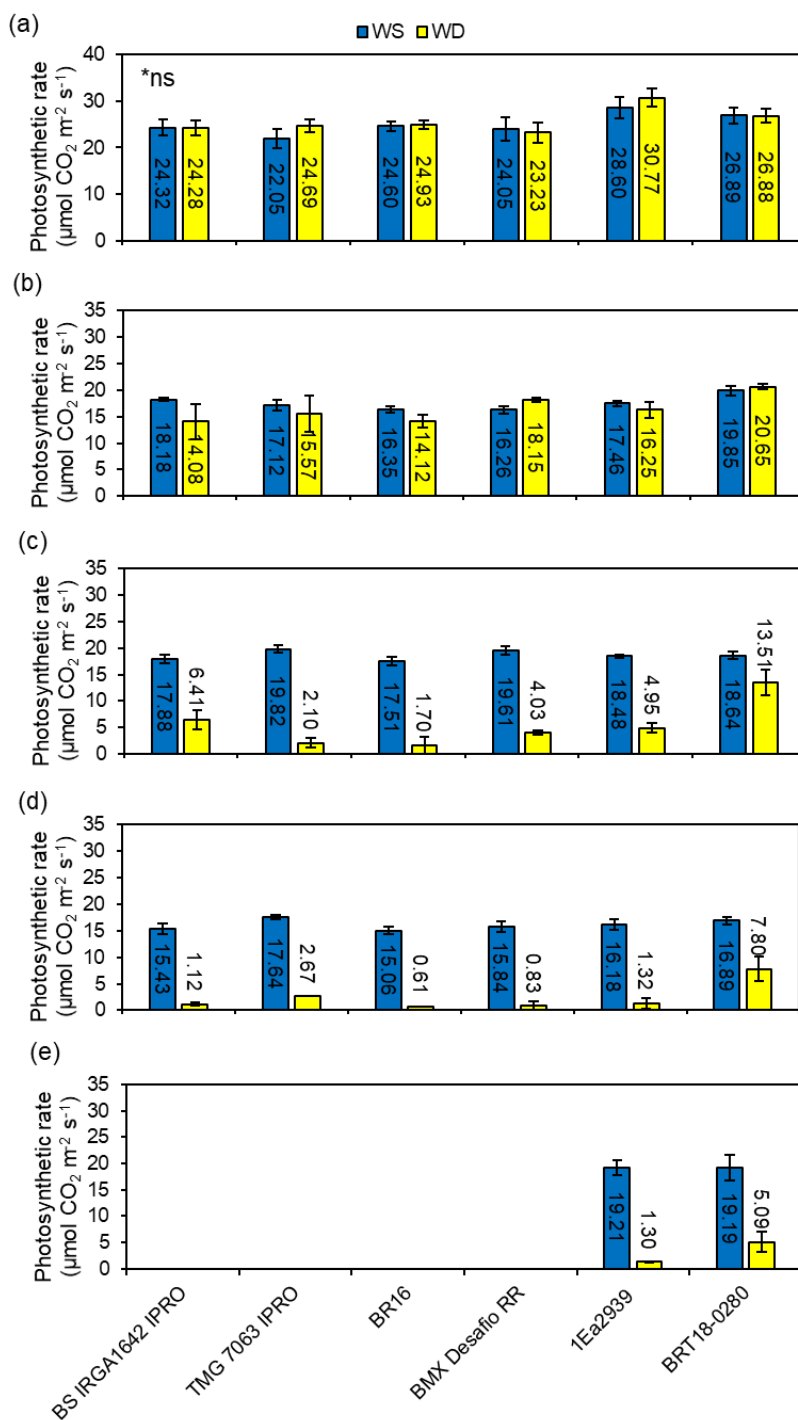


Figure 13. Photosynthetic rate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) for soybean genotypes BS IRGA 1642 IPRO, TMG 7063 IPRO, BR16, BMX Desafio RR, AtAREB1 1Ea2939 (Background BR16) and AtAREB1 BRT18-0280 (BR16 x AtAREB1 1Ea2939) with water supply (WS) and water deficit (WD), on the 1st, 10th, 12th, 13th and 14th days after the beginning of the experiment.

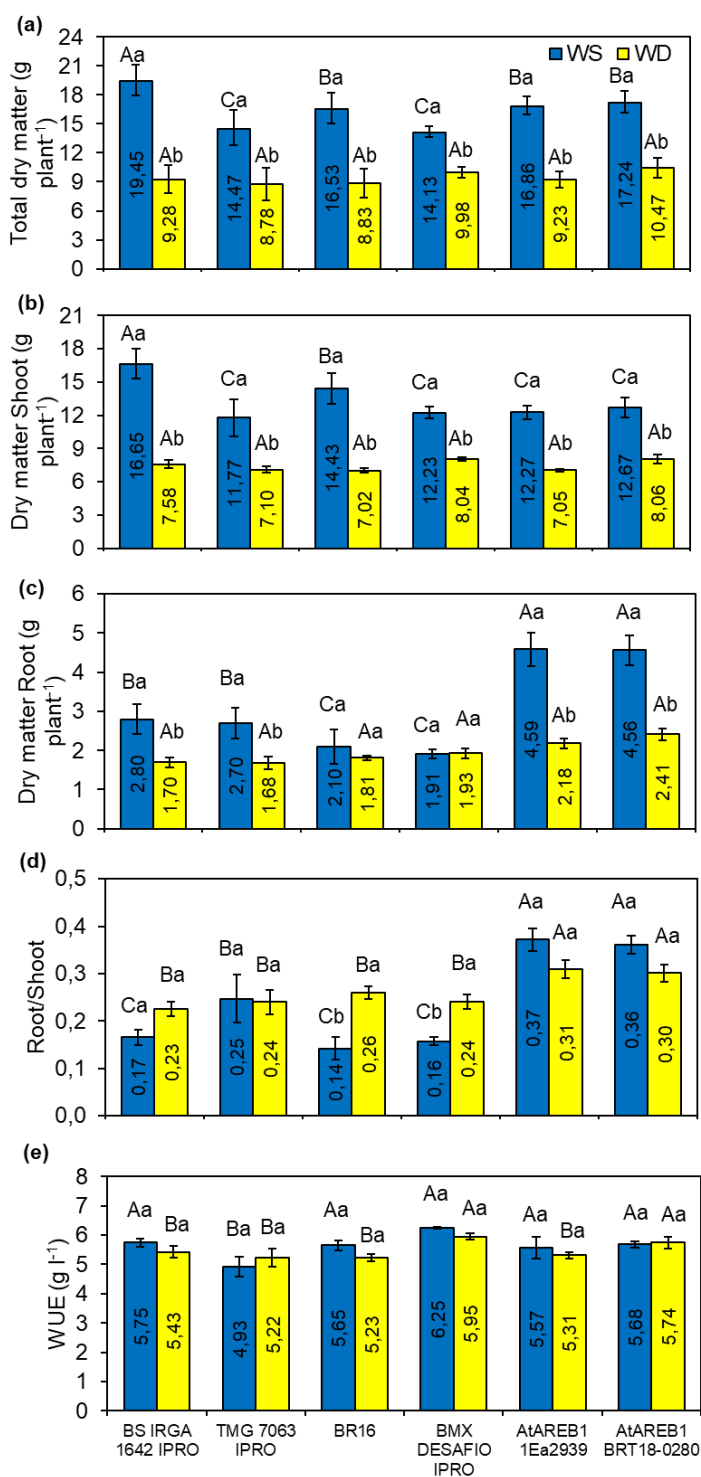


Figure 14. Total dry matter (a), shoot biomass (b), root biomass (c), root/shoot ratio (d) and water use efficiency (WUE) (e) for dry biomass accumulation of soybean genotypes cultivated without deficit (WS) and with water deficit (WD). *Uppercase letters compare cultivars and lowercase letters compare of water regimes at 5% probability of error by the Skott Knott test.

3.2.4 Discussion

This study determined the response of physiological processes to drought in soybean lines with transcription factor AtAREB1 and in commercial cultivars with different sensitivities to drought. We identified the possibility of increasing WUE and drought tolerance with the improvement of the AtAREB1 soybean through hybridization with high yield potential cultivars such as BMX Desafio RR (Figure 15).



Figure 15. Soybean plants at 15 days after water suppression. From left to right: BR16, 1Ea2939, BRT18-0280 and BMX Desafio RR.

Genotypes with TF AtAREB1 showed less daily transpiration. Daily transpiration is a function of leaf area and stomatal conductance (Gorthi et al., 2019). The TF AtAREB1 genotype and the BMX Desafio RR cultivar show slower leaf growth than other cultivars and greater stomatal conductance already identified by Marinho et al (2015) in the AtAREB1 genotypes. These ecophysiological characteristics of AtAREB1 genotypes make it possible to save water in the soil to maintain the photosynthetic process for a longer period without the presence of rain.

Although the AtAREB1 lines showed slower leaf growth, there was no statistical difference between cultivars for total dry matter accumulation in a drought environment. Lower shoot growth in AtAREB1 lines is at the cost of more root growth, resulting in a

higher root/shoot ratio. Overexpression of AREB1 transcription factors promotes plant hypersensitivity to ABA (Marinho et al., 2015). Studies show that increased concentrations of ABA are necessary to prevent excess ethylene production in tissues under water stress, playing a role in promoting root growth rather than inhibiting it (Sharp et al., 2001; Sharp, LeNoble, 2002). This interaction between ABA and ethylene possibly explains the higher root volume of AtAREB1 lines in irrigated pots, while in pots with water deficit, the high ethylene production in stressed plants inhibits root growth similar to other cultivars, what needs further studies.

A low threshold FTSW value for NLTR is an interesting trait for periods of water deficit, as the plant does not oscillate in the rates of physiological processes such as photosynthesis and transpiration (MINUSSI WINCK et al., 2022), although the consumption available water in soil occurs quickly if leaf growth is at a rate greater than root growth. The higher root/shoot ratio allows plants to maintain the transpiration rate in the potential condition for a longer period (Li et al., 2020), which explains the low threshold FTSW values for NLTR in AtAREB1 lines. On the other hand, some cultivars can express morphological and physiological traits to avoid drought, saving water and tolerating the lack of rain for a longer period (Ye et al., 2020). It can be considered that the soybean tolerance mechanism with TF AtAREB1 involves saving water to survive longer through slow leaf growth at the expense of root growth, resulting from low daily transpiration and maintenance of photosynthesis rate for longer time. This is a favorable characteristic for environments with water restrictions, because, if rain stops, plants have a greater reserve of water in the soil to maintain their physiological activities for a longer period, with their stomata open to maintain the photosynthesis rates, which is this this feature is desirable under climate change scenarios and can make the cultivation of soybean viable in semi-arid regions with poorly distributed rainfall around the world (Noia Júnior et al., 2020). Likewise, the cultivars BMX Desafio RR and BS IRGA 1642 IPRO also showed low threshold FTSW values for NLTR, a trait that provides high production stability and explaining the widespread use of the BMX Desafio RR cultivar by farmers in Brazil.

We have identified improvements in drought tolerance response in soybeans with second-generation TF AtAREB1 (BRT18-0280), which tolerated more days under drought. BRT18-0280 also showed low threshold FTSW value for LRT, high root/shoot

ratio, and higher WUE under drought. The WUE results reinforce the greater physiological efficiency for drought tolerance that can be achieved by combining transgenics with the AtAREB1 gene and genetic improvement in the context of the interaction between genotype and environment.

A major challenge in breeding programs is to develop plants that both are tolerant to water deficit and with high yield potential (Ribichich et al., 2020). Our results indicate that this challenge involves selecting genotypes that have low threshold FTSW values (extract more water from the soil to maintain physiological processes in potential conditions) and, at the same time, tolerate several days of drought. Studies to understand the differential depletion of soil water by improved plants is of utmost importance to identify opportunities for improvements in drought tolerance (Lawlor, 2013). Our study evaluated morphophysiological traits for drought tolerance of improved soybeans with TF AtAREB1 lines, and is a proof of concept necessary for releasing new cultivars with drought tolerance that should be tested in field conditions. The adoption of drought tolerant cultivars by farmers will only occur if they present better performance under field conditions, and has the potential to significantly increase soybean production in regions where water deficit is the main limiting factor for productivity (Sentelhas et al., 2015; Tagliapietra et al., 2021; Global Yield Gap Atlas, 2021) and reduce annual losses of billions of dollars in soy production in the world (Minussi Winck et al., 2021).

3.2.5 References

Barbosa, EGG, Leite, JP, Marin, SRR, Marinho, JP, Carvalho, JFC, Fuganti-Pagliarini, R, Farias, JRB, Neumaier, N, Marcelino-Guimarães, F, Oliveira, MCN, Yamaguchi-Shinozaki, K, Nakashima, K, Maruyama, K, Kanamori, N, Fujita, Y, Yoshida, T & Nepomeceno, AL (2012) Overexpression of the ABA-dependent AREB1 transcription factor from *Arabidopsis thaliana* improves soybean tolerance to water deficit. *Plant Mol Biol Report* 31, 719–730. 1. <https://doi.org/10.1007/s11105-012-0541-4>

Conjin, JG, Bindraban, OS, Schroder, JJ & Jongschaap, REE (2018) Can our global food system meet food demand within planetary boundaries? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 251, 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.001>

Fehr, WR. & Caviness, CE. (1977) Stages of soybean development. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 15p. (Special Report, 80).

Food and Agriculture Organization. (2021). FAOSTAT: Food and agriculture data. Retrieved from <http://www.fao.org/faostat/en/#home> Access: September 24, 2021.

Global Yield Gap Atlas. Global Yield Gap and Water Productivity Atlas. Retrieved from: <http://www.yieldgap.org/>. Access: October 12, 2021.

Gonzalez, FG, Rigalli, N, Miranda, PV, Romagnoli, M, Ribichich, KF, Trucco, F, Portapila, M, Otegui, ME & Chan RL. (2020) An Interdisciplinary Approach to Study the Performance of Second-generation Genetically Modified Crops in Field Trials: A Case Study With Soybean and Wheat Carrying the Sunflower HaHB4® Transcription Factor. *Frontiers in Plant Science* 11 (178), 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00178>

Gorthi, A, Volenec, JJ & Welp LR (2019) Stomatal response in soybean during drought improves leaf-scale and fieldscale water use efficiencies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 276-277, 107629. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107629>

Grassini, P, Van Bussel, LGJ, Van Wart, J, Wolf, J, Claessens, L, Yang, H, Boogaard, H, De Groot, H, Van Ittersum, MK & Cassman, KG (2015) How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crops Research*, 177, 49-63. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.004>

Guo, Y, Tian, S, Liu, S, Wang, W & Sui N (2018) Energy dissipation and antioxidant enzyme system protect photosystem II of sweet sorghum under drought stress. *Photosynthetica*, 56, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0741-0>

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte V, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Lawlor, DW (2013) Genetic Engineering to improve plant performance under drought: Physiological evaluation of achievements, limitations and possibilities. *Experimental Botany*, 64, 83–108. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers326>

Lecouer, J & Sinclair, TR (1996) Field pea transpiration and leaf growth in response to soil water deficits. *Crop Science*, 36, 331-335. <https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600020020x>

Li, S, Cao, Y, Wang, C, Sun, X, Wang, W & Song, S. (2020) Contribution of different genotypic roots to drought resistance in soybean by a grafting experiment. *Plant Production Science*, 24 (3), 317-325. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2020.1839350>

Marinho, JP, Kanamori, N, Ferreira, LC, Pagliarini, RF, Carvalho, JFC, Freitas, RA, Marin, SRR, Rodrigues, FA, Henning, LMM, Farias, JRB, Neumaier, N, Oliveira, MCN, Guimarães, FCM, Yoshida, T, Fujita, Y, Shinozaki, KY, Nakashima, K & Nepomuceno AL

(2015) Characterization of Molecular and Physiological Responses Under Water Deficit of Genetically Modified Soybean Plants Overexpressing the AtAREB1 Transcription Factor. *Plant Molecular Biology Reporter*, 34, 410–426. <https://doi.org/10.1007/s11105-015-0928-0>

Martignago, D, Rico-Medina, A, Blasco-Escámez, D, Fontanet-Manzanque, JB & Caño-Delgado, AI (2020) Drought Resistance by Engineering Plant Tissue-Specific Responses. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1676. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01676>

Merlos, FA, Monzon, JP, Mercu, JL, Taboada, M, Andrade, FH, Hall, AJ, Jobbagy, E, Cassman, KG & Grassini, P (2015) Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*, 184, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.001>

Minussi Winck, JE, Sarmento, LFV, Zanon, AJ, Librelon, SS, Garcia, A & STRECK, NA (2021) Growth and transpiration of soybean genotypes with HaHB4® transcription factor for drought tolerance. *Physiologia Plantarum*, 1–8. <https://doi.org/10.1111/ppl.13557>

Molinari, MDC, Fuganti-Pagliarini, R, Marin, SRR, Ferreira, LC, Barbosa, DA, Marcolino-Gomes, J, Oliveira, MCN, Mertz-Henning, LM, Kanamori, N, Takasaki, H, Urano, K, Shinozaki, K, Nakashima, K, Yamaguchi-Shinozaki, K & Nepomuceno AL (2020) Overexpression of AtNCED3 gene improved drought tolerance in soybean in greenhouse and field conditions. *Genetics and Molecular Biology (Online version)*, 43, 20190292. <https://doi.org/10.1590/1678-4685-GMB-2019-0292>

Nóia Júnior, RS, Fraise, CW, Karrei, MAS, Cerbaro, VA & Perondi, D (2020) Effects of the El Niño Southern Oscillation phenomenon and sowing dates on soybean yield and on the occurrence of extreme weather events in southern Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 290, 108038. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108038>

Nunes, PAA, Laca, EA, Carvalho, PCF, Li, M, Souza-Filho, W, Kunrath, TR, Martins, AP & Gaudin, A (2021) Livestock integration into soybean systems improves long-term system stability and profits without compromising crop yields. *Scientific Reports*, 11, 1649. . <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81270-z>

Pagliarini, R, Rockenbach-Marin, S, Molinari, MDC, Daiane, C, Barbosa, DA, Molinari, HBC, Mertz-Henning, LM, Neumaier, N, Farias, JRB, Nakashima, K, Yamaguchi-Shinozaki, K & Nepomuceno AL (2020) Drought-tolerant soybean development: evaluation of GM lines under greenhouse and field conditions. *JIRCAS Working Report*, v. 91, 57-88. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28176.02569>

Pagliarini, RF, Ferreira, LC, Rodrigues, FA, Molinari, HBC, Marin, SRR, Molinari, MDC, Marcolino-Gomes, J, Mertz-Henning, LM, Farias, JRB, Oliveira, MCN, Neumaier, N, Kanamori, N, Fujita, Y, Mizoi, J, Nakashima, K, Yamaguchi-Shinozaki, K & Nepomuceno AL (2017) Characterization of Soybean Genetically Modified for Drought Tolerance in Field Conditions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00448>

Riar, MK, Cerezini, P, Manandhar, A & Sinclair, TR (2018) Expression of Drought-Tolerant N₂ Fixation in Heterogeneous Inbred Families derived from PI471938 and Hutcheson Soybean. *Crop Science*, 58, 364–369. <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.02.0089>

Ribichich, KF, Chiozza, M, Britez, SA, Cabello, JV, Arce, AL, Watson, G, Farias, C, Portapila, M, Trucco, F, Otegui, ME & Chan, R (2020) Successful field performance in warm and dry environments of soybean expressing the sunflower transcription factor HaHB4. *Journal of Experimental Botany*, 71 (10), 3142-3156. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa064>

Richter, GL, Zanon, AJ, Streck, NA, Guedes, JVC, Kraulich, B, Rocha, TSM, Winck, JEM & Cera, JC (2014) Estimating leaf area of modern soybean cultivars by a non-destructive method. *Bragantia*, 73, 416-425. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0179>

Sentelhas, PC, Battisti, R, Câmara, GMS, Farias, JRB, Hampf, AC & Nendel, C (2015) The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *Journal of Agricultural Science* 153: 1394–1411. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000313>

Sharp, RE & Lenoble, ME (2002) ABA, ethylene and the control of shoot and root growth under water stress. *Journal of Experimental Botany*, 53 (366), 33–37. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.366.33>

Sharp, RE (2001) Interaction with ethylene: changing views on the role of abscisic acid in root and shoot growth responses to water stress. *Plant, Cell & Environment*, 25 (2), 211-222. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00798.x>

Shinozaki, K & Yamaguchi-Shinozaki, K (2007) Gene networks involved in drought stress response and tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 58, 221-227. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl164>

Silva, LS & Gatiboni, LC (2016) Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, Vol. 1, 11th edition. Santa Maria: SBCS, p. 376.

Sinclair, TR & Ludlow, MM (1986) Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. *Australian Journal Plant Physiology*, 13, 319-340. <https://doi.org/10.1071/PP9860329>

Souza, AT, Streck, NA, Heldwein, AB, Bisognin, DA, Winck, JEM, Rocha, TSM & Zanon, AJ (2014) Transpiration and leaf growth of potato clones in response to soil water deficit. *Scientia Agricola* 71, 96-104. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162014000200002>

Streck, NA (2004) Do we know how plants sense a drying soil? *Ciencia Rural* 34 (2), 581-584. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000200039>

Tagliapietra, EL, Zanon, AJ, Streck, NA, Balest, DS, Rosa, SL, Bexaira, KP, Richter, GL, Ribas, GG & Silva, MR (2021) Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. *Agronomy Journal*, 113, 1882–1894. <https://doi.org/10.1002/agj2.20586>

Wu, A, Hammer, GL, Doherty, A, Caemmerer, SV & Farquhar, GD (2019) Quantifying impacts of enhancing photosynthesis on crop yield. *Nature Plants* 380, (5), 380–388. <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0398-8>

Ye, H, Song, L, Schapaugh, W, Ali, L, Sinclair, T, Riar, M, Raymond, R, Li, Y, Vuong, T, Valliyodan, B, Neto, A, Usovsky, M, Song, Q, Shannon, J, Chen, P & Nguyen, H (2019) The importance of slow canopy wilting in drought tolerance in soybean. *Journal of Experimental Botany*, 71 (2), 642–652. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz150>

Zhao, C, Liu, B, Piao, S, Wang, X, Lobell, DB, Huang, Y, Huang, M, Yao, Y, Bassu, S, Ciais, P, Durand, JL, Elliott, J, Ewert, F, Janssens, Ia, Li, T, Lin, E, Liu, Q, Martre, P, Muller, C, Peng, S, Peñulas, J, Ruane, AC, Wallach, D, Wang, T, Wu, D, Liu, Z, Zhu, Y, Zhu, Z & Asseng, S (2017) Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *PNAS*, 114 (35), 9326–9331. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>

3.3ARTIGO 3 - GROWTH AND TRANSPIRATION OF SOYBEAN GENOTYPES WITH HaHB4® TRANSCRIPTION FACTOR FOR DROUGHT TOLERANCE - (*Publicado na Physiologia Plantarum* - DOI: 10.1111/ppl.13557)

José Eduardo Minussi Winck¹, Luiz Felipe Vieira Sarmiento¹, Alencar Junior Zanon¹, Samira Santiago Librelon²; Alexandre Garcia²; Nereu Augusto Streck¹

¹Universidade Federal de Santa Maria, Depto. de Fitotecnia, Av. Roraima, Prédio 77, CEP 97105-900, Camobi, Santa Maria, RS, Brasil

²Tropical Melhoramento e Genética S.A, Rodovia Celso Garcia Cid, km 87, Cx Postal 387, Parque Industrial, CEP 86183-600, Cambé, PR, Brasil

Correspondence

*Corresponding author,
email: eduardo.winck@hotmail.com

ABSTRACT

The expression of HaHB4® transcription factor reduces soybean sensitivity to abiotic stresses, such as water deficit. Studies that quantify the tolerance of HaHB4® soybean to the soil water content in comparison with cultivars currently sown in Brazil are lacking. The objective of this study was to determine the level of drought tolerance of soybean genotypes expressing the HaHB4® transcription factor (TS18-6-610108 and TS18-6-610084) and commercial cultivars (TMG 7063 IPRO and BS IRGA 1642 IPRO) subjected to water deficit during the vegetative phase. We used the fraction of transpirable soil water (FTSW) approach. Parameters related to leaf transpiration, dry matter accumulation, water use efficiency (WUE), and transpiration coefficient (TC) were evaluated in the four soybean genotypes and two treatments (T1—100% replacement of transpired water and T2—without replacement of transpired water). The FTSW threshold for the decline in transpiration was evaluated to identify the onset of water stress in soybean. TS18-6-610108 and BS IRGA 1642 IPRO maintains potential transpiration at low FTSW values. The TS18-6-610108 genotype has 14% higher WUE than the sensitive cultivar under

water deficit. Under well-irrigated conditions, the HaHB4® genotypes showed the highest TC values, which indicate well-functioning physiological processes.

3.3.1 Introduction

Water deficit is the main limiting factor in the production of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) worldwide (Rosa et al., 2018). In Brazil, there is an estimated yield gap of 1600 kg ha⁻¹ due to water deficit (Sentelhas et al., 2015). This yield loss results from oxidative stress, increased photorespiration and reduction in the physiological processes of the plant (Guo et al., 2018), such as the symbiotic fixation of N₂ (Riar et al., 2018), stomatal conductance, leaf growth (Wu et al., 2018), and photosynthesis (Martignago et al., 2020; Pagliarini et al., 2017).

Soybean plants have biochemical mechanisms that try and maintain the water potential as long as possible (Jumrani & Bhatia, 2019). These mechanisms are controlled by hormone signaling pathways and stress-responsive transcription factors (TFs), which are the basic mediators to tolerate or avoid the negative effects of water deficit (Martignago et al., 2020). Upon water deficit conditions, there is induction of hormone synthesis, such as abscisic acids and ethylene acting as chemical messengers to activate various physiological processes, including stomatal closure, stimulation of root growth, leaf senescence, and accumulation of osmolites to prevent drought stress (Becker et al., 2021; Morgan & Drew, 1997; Ullah et al., 2018).

Recently, there have been studies selecting transgenic events in soybean that lead to improved drought tolerance (Marinho et al., 2015; Marinho et al., 2019; Pagliarini et al., 2017; Ribichichi et al., 2020). Drought tolerance is regulated by several genes, including TFs that enable plants to withstand unfavorable conditions. TFs are potential genomic candidates for their wide application in crop breeding (Joshi et al., 2016; Zandalinas et al., 2018). In this context, the HaHB4® technology emerged, a transgenic soybean event generated from *Agrobacterium* mediated transformation containing the sunflower TF gene variant HaHB4®. The expression of the HaHB4® gene reduces the sensitivity of plants to ethylene. HaHB4® belongs to a subclass of HD-Zip I genes that are primarily involved in abiotic stress responses, which help plants tolerate stresses by assisting in the direct and

indirect management of multiple environmental challenges such as water deficit, saline exposure, abscisic acid and ethylene, photosynthesis, mechanical damage, and herbivory (Manavella et al., 2006; Manavella et al., 2008).

In Argentina, under field conditions, HaHB4® soybean showed increased grain productivity of 4.05–10.50% (in hot and dry environments) compared to control (Ribichichi et al., 2020). Soybeans expressing the HaHB4® TF will be available in the Brazilian market as an alternative to improve the tolerance of cultivars to drought (Ribichichi et al., 2020). However, there is a lack of studies that quantify the tolerance to water deficit of the HaHB4® soybeans to water deficit in relation to soil water content and comparative studies with cultivars currently cultivated in Brazil.

A widely accepted method to evaluate the response of plants to soil water deficit is the fraction of transpirable soil water (FTSW) approach (Ritchie, 1981; Sinclair, 2020). This method measures the amount of water extracted by plant transpiration with high accuracy (Beseli et al., 2020; Gunasekaran et al., 2019; Riar et al., 2018). The objective of this study was to determine the level of drought tolerance of soybean genotypes with the HaHB4® TF and commercial cultivars subjected to water deficit during the vegetative phase using the FTSW approach.

3.3.2 Materials and methods

3.3.2.1 Site and experimental design

The experiment with soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) was conducted in Cambé (23°15'01" S, 51°14'59" W), Paraná, Brazil, to assess the response of transpiration to soil drying. Two transgenic HaHB4® soybean genotypes (TS18-6-610108 and TS18-6-610084) and two commercial genotypes (TMG 7063 IPRO and BS IRGA 1642 IPRO) were grown in two conditions of soil water (T1—100% replacement of transpired water and T2—without replacement of transpired water). The commercial cultivars in this study were chosen because (1) of their different sensitivity to water deficit as reported by farmers and experts (TMG 7063 IPRO is reported as sensitive to water deficit and BS IRGA 1642 IPRO is reported as tolerant to water deficit); (2) they belong to breeding programs with

different objectives (TMG 7063 IPRO was bred for environments with high yield potential, while BS IRGA 1642 IPRO was bred to guarantee production stability in environments with low production potential); and (3) they belong to maturity groups between 6.3 and 6.4, thus representing soybean cultivation at latitudes from 15° to 35°S.

The experimental design was completely randomized, with a 4 × 2 factorial scheme. Seeds were sown on December 16, 2019 in 8-L pots in a greenhouse. Five seeds inoculated with *Bradyrhizobium japonicum* (to form nitrogen-fixing symbioses) were sown per pot, and after the emergence, the plants were thinned to one plant per pot. The soil used in the experiment was from the top layer (from 0 to 20 cm) of a typical Udoxisol with 65% clay and 35% field capacity. Seven replicates of each cultivar for T1 and nine replicates for T2 were used, totaling 64 pots. The correction of soil nutrients and acidity was made according to soil analysis and local recommendations for soybean to avoid nutritional limitations and toxicity for the plants (Silva & Gatiboni, [2016](#)). At the end of the experiment, the soil had a pH of 6.2, 91% base saturation, 14.0 cmolc dm⁻³ cation exchange capacity, 349.1 mg L⁻¹ phosphorus, and 260 mg L⁻¹ potassium.

3.3.2.2 Application of water deficit

To evaluate the plant response to water deficit, the concept of the FTSW was used, as in Sinclair and Ludlow (1986), and more recently in Riar et al. (2018) and Becker et al. (2021). To determine the FTSW, two stages of water deficit are considered (Sinclair & Ludlow, 1986). Stage 1: when water is freely available in the soil, the plant has no water deficit and its stomatal conductance and transpiration are at maximum, which means that the content of transpirable water in the soil does not limit stomatal conductance and transpiration and Stage 2: when the available water in the soil decreases, the plant decreases its stomatal conductance and transpiration to maintain its water balance and cell turgor (limiting excessive water loss).

The water deficit was imposed at V6 stage according to the phenological scale of Fehr and Caviness (1977). The period of water stress was 16 days starting at the V6 stage. Just before starting the treatments, all pots were saturated with water and allowed to drain for 24 h to reach field capacity. In order to minimize water loss via evaporation

from the soil, all pots were covered with a plastic film. This procedure was done to ensure that the loss of water from the soil occurred only by the plant transpiration.

Every day, all pots were weighed using an electronic scale with a maximum capacity of 50 kg and accuracy of 5 g. Shortly after the daily weighing, each T1 pot was irrigated with the amount of water lost by the plant's transpiration, determined by the difference between the pot weight on the specific day and the initial weight (pot weight on the day the water deficit was applied). The average accumulated biomass was of 1.32 g day⁻¹ (less than the precision of the electronic scale), which allowed it to be disregarded for irrigation. For T2, with water deficit, plants did not receive irrigation.

The FTSW was calculated by the following equation (Sinclair & Ludlow, 1986):

$$\text{FTSW} = \frac{\text{MT}_{2j} - \text{MT}_{2i}}{\text{MT}_{2i} - \text{MT}_{2f}} \quad (1)$$

where MT2 is the mass of each pot in T2 (g per pot), “j” refers to the day, “i” indicates MT2 on the starting day of the application of water deficit (beginning of the experiment), and “f” indicates MT2 on the last day of the experiment.

The experiment ended when T2 plants reached the relative transpiration (RT) of 10% in relation to T1 plants. The final mass was considered the mass of the pot when RT reached 10%. The 10% limit was imposed because it is assumed that the stomata are closed below this transpiration rate and the water loss is due only to the epidermal conductance (Sinclair & Ludlow, 1986). RT was calculated using the following equation (Sinclair & Ludlow, 1986):

$$\text{RT} = \frac{\text{MT}_{2j} - \text{MT}_{2(j-1)}}{[\sum (\text{MT}_{1j} - \text{MT}_{1(j-1)})] / n} \quad (2)$$

where MT2 is the mass of each pot in T2 (g per pot), MT1 is the mass of each pot in T1 (g per pot), “j” refers to the day, “j-1” refers to the previous day, and “n” represents the number of replicates (plants) in T1.

The total dry matter (DM) of each part of the plant (root, leaf, and stem) was determined in an oven at 65°C (in four replicates per genotype at the beginning of the

experiment and in all replicates at the end of the experiment). The accumulated DM (ADM) during the experiment was calculated as:

$$ADM = DM_f - DM_i \quad (3)$$

where ADM is the accumulated dry mass, DM_f is the final dry mass, and DM_i is the initial dry mass.

With the values of ADM, the transpiration coefficient (TC) was calculated, which is an indicator used to compare the water use efficiency (WUE) by plants. The TC provides the amount of water needed for the production of 1 kg of biomass (L H₂O kg⁻¹ dry mass). The TC was determined according to:

$$TC = \frac{TT}{ADM} \quad (4)$$

where TT is the total transpiration (L per plant). The WUE (g plant⁻¹ mm⁻¹) was also calculated using the following equation:

$$WUE = \frac{ADM}{TT} \quad (5)$$

3.3.2.3 Normalization of variables

The transpiration variable was normalized twice, as done in previous studies (Becker et al., 2021; Riar et al., 2018; Souza et al., 2014). The first normalization was calculated as the ratio between the individual values of transpiration at T2 divided by the average value of the variables at T1 on each day. The second normalization was calculated each day for RT in each T2 vessel, between the value of the day and the initial average of RT, when the FTSW was greater than 0.55 to obtain the NRT. This procedure resulted in values close to 1.0 for each plant in the first days of the experiments.

The logistic function was fitted to the data of NRT as a function of the FTSW for each genotype (Lecoeur & Sinclair, 1996; Sinclair & Ludlow, 1986): $Y = 1/(1 + \exp(-a$

(Xb)), where Y is the dependent variable (NRT), X is the FTSW, and “ a ” and “ b ” are the empirical coefficients (Sinclair & Ludlow, 1986), which were estimated by nonlinear regression analysis using the GraphPad Prism version 8.0.1 software. The moment when the soil water content affects the NRT is the FTSW threshold. The threshold values of the FTSW for NRT were estimated by the logistic equation as being the value of FTSW when NRT is equal to 0.95.

3.3.2.4 Meteorological variables and statistical analysis

Daily minimum and maximum air temperatures were measured throughout each experiment with a thermohygrograph, located inside the greenhouse and near the plants (Figure 16). The temperatures in the greenhouse ranged from 18.5 to 34°C, whereas the average vapor pressure deficit was 1.06 kPa (Figure 16).

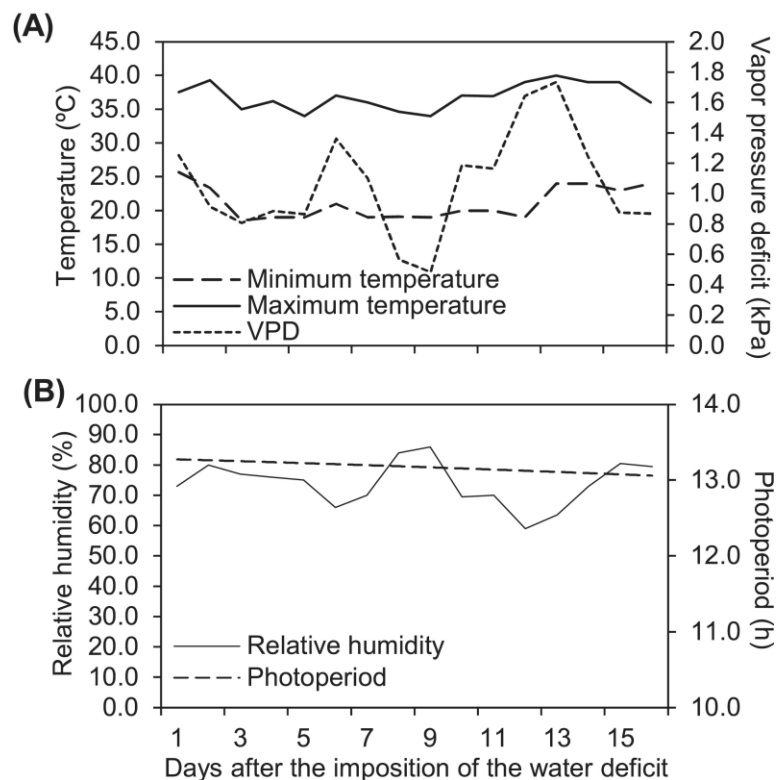


Figure 16. Temperature and vapor pressure deficit (A) and relative humidity and photoperiod (B) during experiment

The variables were subjected to analysis of variance (test F) and means were compared by the Scott–Knott test at 10% probability of error using the GraphPad Prism version 8.0.1 software.

3.3.3 Results

3.3.3.1 DM accumulation in water deficit environment

The water deficit reduced the accumulation of DM by 52% (Table 2). There was no significant difference in DM accumulation between genotypes. The leaf DM is the part of the plant most affected by the water deficit, with a reduction of 58%, compared to well-watered plants, followed by stems and roots with reductions of 50 and 45%, respectively. In all genotypes, the highest root/shoot ratio was found without irrigation (T2). At T2, the HaHB4® genotypes had a higher root/shoot ratio.

Table 2. Dry matter accumulation of leaf, stem, root, and total per soybean plant of four genotypes in treatments without deficit (T1) and with water deficit (T2).

Genotype	Leaf (g plant ⁻¹)		Stem (g plant ⁻¹)		Root (g plant ⁻¹)		Total (g plant ⁻¹)		Root/Shoot									
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2								
TMG 7063 IPRO	6.65	2.94	6.64	3.56	4.39	2.52	17.69	9.02	0.33	0.39								
BS IRGA 1642 IPRO	7.89	3.05	6.46	3.03	5.38	2.47	19.73	8.54	0.37	0.41								
TS18-6-610108	7.98	3.47	6.83	3.53	5.54	3.33	20.35	10.33	0.37	0.46								
TS18-6-610084	7.53	3.00	5.69	2.58	5.08	2.89	18.30	8.47	0.38	0.52								
Mean	7.51	a*	3.11	b	6.40	a	3.17	b	5.10	a	2.80	b	19.02	a	9.09	b	0.36	0.44
CV (%)	41.14		32.51		30.61		30.77											

* The means followed by the same lowercase letter in the row and the same uppercase letter in the column do not differ by the Scott-Knott test ($p < 0.10$). $n =$ seven individual plants per genotype in T1 and nine individual plants per genotype in T2.

3.3.3.2 Ecophysiological indicators

The different responses of the genotypes under the condition of drought are related to some ecophysiological traits. The total amount of transpired water and the average daily transpiration did not differ between the genotypes (Table 3). There was a difference only between the two water regimes. The T2 consumed 53% less volume of water transpired than T1.

Table 3. Total transpiration and mean daily transpiration of soybean genotypes without deficit (T1) and with water deficit (T2).

	Total transpiration (L)				Mean daily transpiration (L day ⁻¹)			
	T1		T2		T1		T2	
TMG 7063 IPRO	3.41	Ba*	1.78	Ab	0.24	a	0.14	b
BS IRGA 1642 IPRO	3.65	Ba	1.76	Ab	0.24	a	0.13	b
TS18-6-610108	4.69	Aa	1.79	Ab	0.27	a	0.13	b
TS18-6-610084	3.70	Ba	1.80	Ab	0.26	a	0.14	b
Mean	3.81		1.78		0.25		0.13	
CV (%)	23.18				22.94			

* The means followed by the same lowercase letter in the row and the same uppercase letter in the column do not differ by the Scott–Knott test ($p < 0.10$). n = seven individual plants per genotype in T1 and nine individual plants per genotype in T2.

There was a 53% reduction in the mean total transpired water in T2, accompanied by a 52% reduction in the ADM (Table 2). The TS18-6-610108 genotype is the most efficient in the use of water, due to its greater accumulation of DM in T2, with the WUE being 14% higher than in TMG 7063 IPRO (cultivar sensitive to water deficit) (Figure 17). This genotype had a reduction of 62% in total transpiration, while the accumulation of DM was reduced by 51%. In well-watered condition, the HaHB4® genotypes showed higher TC values. Higher water consumption in well-watered conditions has already been reported by Ribichichi et al. (2020).

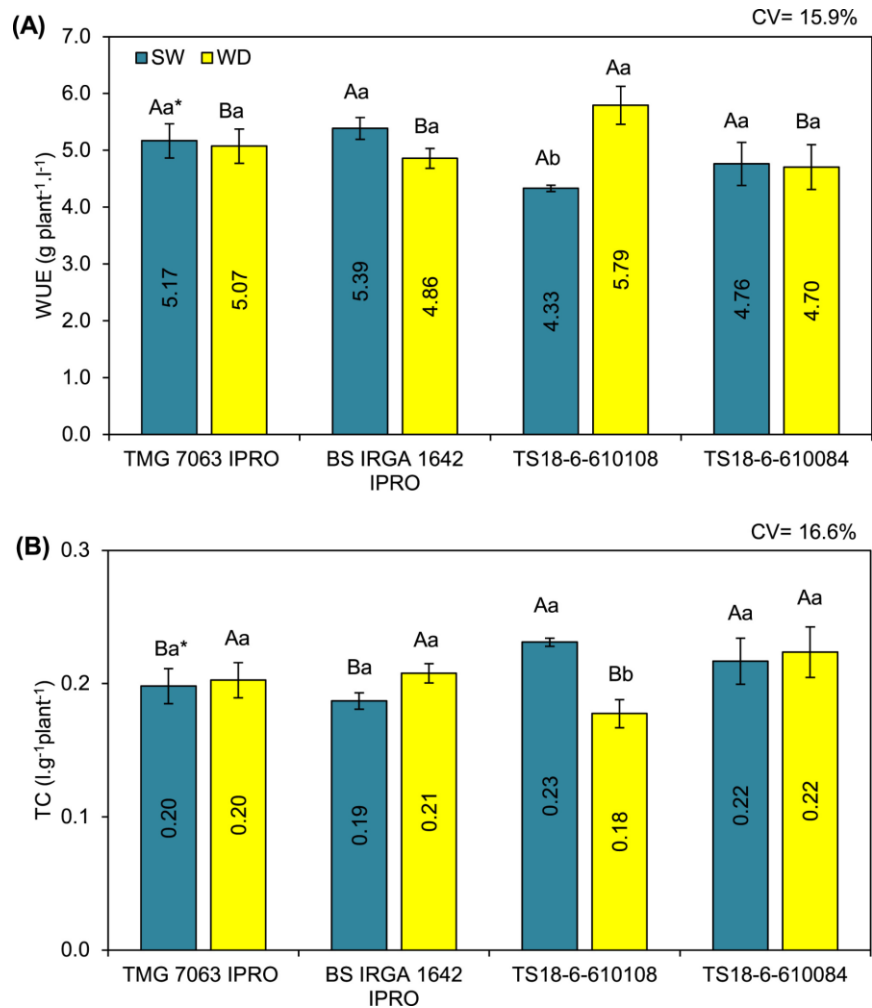


Figure 17. Water use efficiency (WUE) for dry matter accumulation (A) and transpiration coefficient (TC) (B) of soybean genotypes grown without deficit (SW) and with water deficit (WD). *The uppercase letter letters compare the cultivars and the lowercase letters compare the condition of the water in the soil by the Scott–Knott test ($p < 0.10$). $n =$ seven individual plants in SW and nine individual plants in WD

3.3.3.3 Relative transpiration during soil drying

The estimated model to determine the response of NRT to the FTSW was efficient, as it presented R^2 -values from 0.82 to 0.87 (Figure 18). There was a difference in NRT response between genotypes as the FTSW decreases. The estimated FTSW threshold values for NRT were 0.21, 0.15, 0.16, and 0.20 for TMG 7063 IPRO, BS IRGA 1642 IPRO, TS18-6-610108, and TS18-6-610084, respectively.

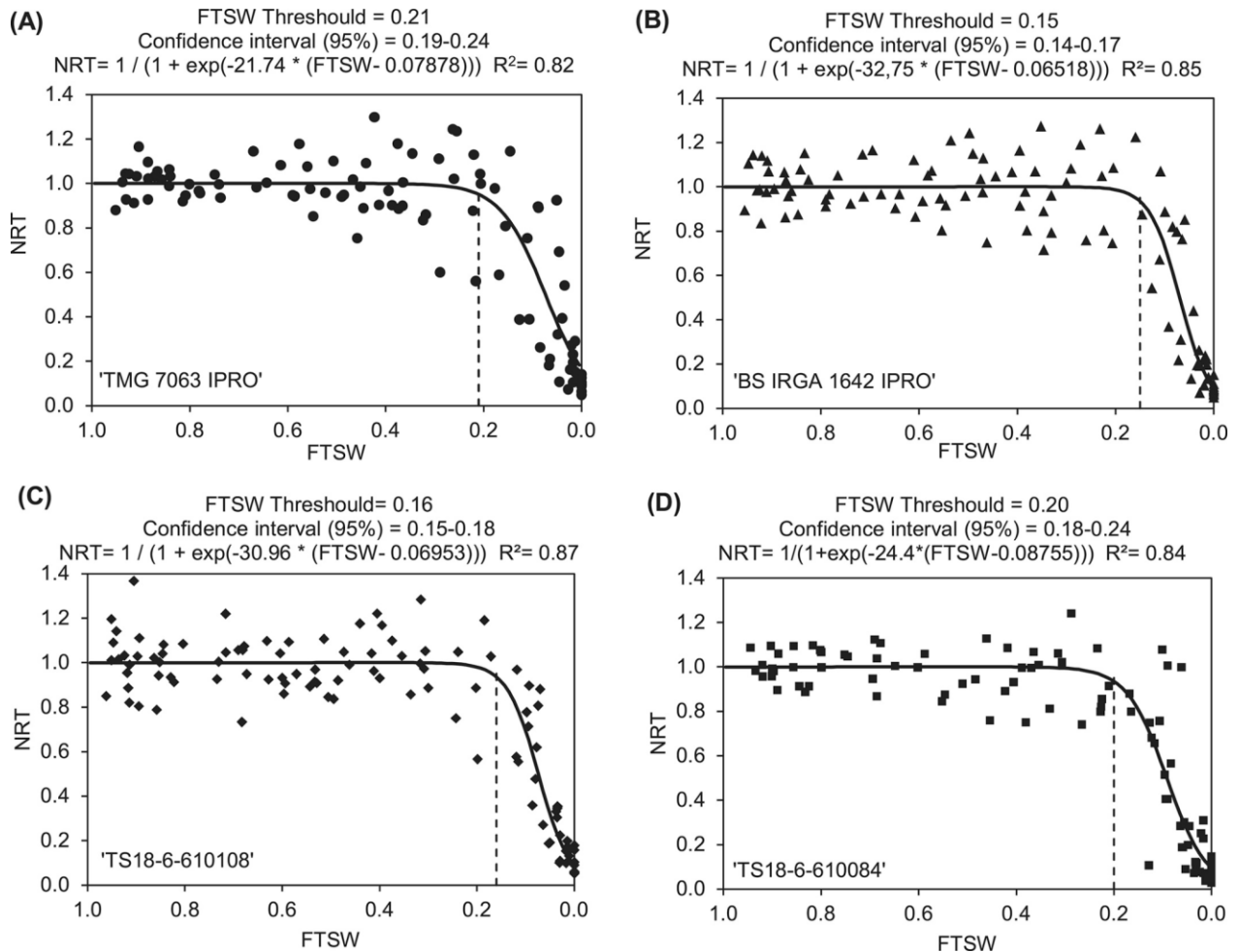


Figure 18. Normalized relative transpiration (NRT) as a function of fraction of transpirable soil water (FTSW) for soybean genotypes TMG 7063 IPRO (A), BS IRGA 1542 IPRO (B), TS18-6-610108 (C), and TS18-6-610084 (D). Threshold FTSW: FTSW when the NRT starts to decrease due to stomatal closure. $n =$ nine individual plants per genotype

As reported by farmers, the BS IRGA 1642 IPRO cultivar is a water deficit-tolerant genotype as it showed a lower threshold FTSW values for NRT (Figure 18) than the cultivar TMG 7063 IPRO, meaning the potential transpiration was maintained for a longer period of time under water deficit.

Our results indicate that the TS18-6-610084 genotype is less tolerant to water deficiency than BS IRGA 1642 IPRO and TS18-6-610108, as it presented a higher threshold FTSW and low WUE under water restriction. High threshold FTSW values represent a restriction on leaf growth at the beginning of the water deficit condition, which can be favorable to environments with very prolonged water stress and in closed canopies, as it would be a defense mechanism for the plant to save water while

maintaining the same photosynthetic rate (Souza et al., 2014). However, this may not be a desirable trait in short periods of water deficit since reductions in photosynthetic rates and rearrangements of physiological functions would be constant, resulting in energy cost and smaller photosynthesis in well-watered conditions (Gonzalez et al., 2019).

3.3.4 Discussion

In this study, we compare the performance of commercial cultivars used in Brazil with HaHB4® genotypes under conditions of induced water deficit during the vegetative phase. A small increase in drought tolerance in new soybean cultivars compared to commonly sown cultivars can significantly increase Brazilian production, where water deficiency is the main productivity limiting factor (Sentelhas et al., 2015; Tagliapietra et al., 2021; Global Yield Gap Atlas, 2021).

The TS18-6-610108 genotype presents the most favorable ecophysiological parameters for drought tolerance, such as a low FTSW threshold value for NRT (0.16) and a high WUE for ADM (5.79 g plant⁻¹ L⁻¹). Recent studies related the accumulation of DM in modern soybean cultivars (Ha et al., 2013; Tagliapietra et al., 2018) and in HaHB4® genotypes (Ribichichi et al., 2020) to grain yield, which makes the WUE a good indicator of selection of cultivars with high yield potential and drought tolerance. High root growth rate under water deficit and the delay in leaf senescence, also observed by Ribichichi et al. (2020), are other physiological mechanisms that help protect against drought in the TS18-6-610108 genotype.

The mechanism of action of the HaHB4® gene is related to the synthesis of ethylene, a hormone responsible for leaf senescence (Manavella et al., 2006). Our results indicate that HaHB4® plants have late senescence and longer life of the leaves, which maintain leaf growth and transpiration even under water deficit. A reduction in ethylene synthesis and inhibition of its transduction pathways generate a delay in leaf senescence that contribute to drought tolerance in transgenic plants as it keeps the photosynthetic apparatus active for longer periods under drought (Manavella et al., 2006). Furthermore, higher values of the root/shoot ratio in the transgenic plants can be explained by the role of ethylene in the regulation of root extension. An interaction between ABA and ethylene

hormones is involved in root elongation (Sharp & LeNoble, 2002). If there is inhibition of ABA synthesis at low water potential, the ethylene production is increased and root elongation is inhibited, whereas inhibition of ethylene biosynthesis action restores root elongation at low water potential (Morgan & Drew, 1997). A high threshold FTSW value is a strategy for plant to save water; however, it results in frequent limitations in leaf gas exchange and photosynthesis rate when short-term water deficits occur. In this case, the loss in photosynthesis activity may not be compensated later during the growing season by the soil water that was saved by plants (Devi et al., 2014). Our results of the TS18-6-610108 genotype complement the findings by Ribichichi et al. (2020), who reported a 10.5% yield gain in environments with high atmospheric demand when compared to the background line. Our results show that the increased tolerance of the TS18-6-610108 genotype is related to its transpiration response in environments with low water content in the soil and greater WUE. This confirms the promise that the HaHB4® genotypes can have greater tolerance to water deficit compared to commercial cultivars currently grown in Brazil.

Transgenic crops for drought tolerance have been continuously obtained and studied in recent years, but with the approach of increasing plant survival in the stress environment, which is often to the cost of grain production. Furthermore, most of the transgenic drought-tolerant plants studied present yield penalties even in well-watered environments (Pagliarini et al., 2017; Valliyodan et al., 2017). In this context, the HaHB4® soybean stands out for not presenting yield penalties under stress-free conditions, which is confirmed by the higher TC values in irrigated plants.

Drought tolerance is a quantitative and complex characteristic. Therefore, interactions between the HaHB4® gene and the background, to which it is introduced, are expected. This fact was evidenced in the results obtained in studies with transgenic genotypes TS18-6-610084 and TS18-6-610108 that show different responses in the analyzed variables. The responses of these interactions are dependent on the sensitivity of the genotype to drought. Recently, proof of concept studies with the HaHB4® soybean were carried out in Argentina to confer greater drought tolerance on a sensitive genotype (Gonzalez et al., 2019; Ribichichi et al., 2020), but more field trials need to be carried with superior HaHB4® genotypes compared to cultivars commercially available. Increase in

drought tolerance only be valid if the new HaHB4® cultivars show better performance than cultivars already used by farmers, such as the TS18-6-610108 genotype. The response of the interaction between genotype and HaHB4® gene are important for licensees responsible for the research and development of the biotechnology and for breeding soybean cultivars HaHB4®, who should introduce and maintain in the breeding programs for commercial cultivars that already express high tolerance to water deficit, such as genotype TS18-6-610108.

This study fills a gap in scientific knowledge, as there are no studies in Brazil that evaluate ecophysiological characters for the ranking of drought tolerant HaHB4® genotypes. This study identified ecophysiological criteria that may help breeders to select genotypes to be used as a background for genetical modifications providing drought tolerance. The validation of the HaHB4® technology in Brazil, together with the robust methodology of the FTSW guarantees a decrease in the loss of soybean productivity due to water deficiency and can reduce the annual losses of billions of dollars of soybean production in the world.

3.3.5 Reference

Becker CC, Streck NA, Gubiani PI, Uhlmann LO, Langner JÁ, Tomiozzo R, Balest DS, Petry MT (2021) Transpiration and leaf growth of gladiolus in response to soil water deficit. *Scientia Horticulturae*, 283, 110031.

Beseli AL, Shekoofa A, Ali M, Sinclair TR (2020) Temporal water use by two maize lines differing in leaf osmotic potential. *Crop Science*, 60, 945-953.

Devi JM, Sinclair TR, Chen P, Carter TE (2014) Evaluation of Elite Southern Maturity Soybean Breeding Lines for Drought-Tolerant Traits. *Agronomy Journal*, 106, 6, 1947-1954.

Fehr WR, Caviness CE (1977) Stages of soybean development. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 15p. (Special Report, 80).

Global Yield Gap Atlas (2021) Brazil. Available from: <https://www.yieldgap.org/brazil> [Accessed 4th June 2021].

Gonzalez FG, Rigalli N, Miranda PV, Romagnoli M, Ribichich KF, Trucco F, Portapila M, Otegui ME, Chan RL (2019) An Interdisciplinary Approach to Study the Performance of Second-generation Genetically Modified Crops in Field Trials: A Case Study With

Soybean and Wheat Carrying the Sunflower HaHB4® Transcription Factor. *Frontiers in Plant Science*, 11 (178), 1-15.

Gunasekaran K, Kholova J, Alimaghani SM, Ganesan M, Chadalavada K, Kumari R, Vadez V (2019) Measurement of transpiration restriction under high vapor pressure deficit for sorghum mapping population parentes. *Indian Journal of Plant Physiology*, 24, 74-85
 Guo Y, Tian S, Liu S, Wang W, Sui N (2018). Energy dissipation and antioxidant enzyme system protect photosystem II of sweet sorghum under drought stress. *Photosynthetica*, 56, 1–12.

Ha CV, Le DT, Nishiyama R, Watanabe Y, Tran UT, Doug NV, Tran LSP (2013) Characterization of the Newly Developed Soybean Cultivar DT2008 in Relation to the Model Variety W82 Reveals a New Genetic Resource for Comparative and Functional Genomics for Improved Drought Tolerance. *BioMed Research International*, 7, 759657.

Joshi R, Wani SH, Singh B, Bohra A, Dar ZA, Lone AA, Pareek A, Sigl-Pareek SL (2016) Transcription Factors and Plants Response to Drought Stress: Current Understanding and Future Directions. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1-15.

Jumrani K, Bhatia VS (2019) Interactive effect of temperature and water stress on physiological and biochemical processes in soybean. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 25, 667–681.

Lecoeur J, Sinclair TR (1996) Field pea transpiration and leaf growth in response to soil water deficits. *Crop Science*, 36, 331-335.

Manavella PA, Arce AL, Dezar CA, Bitton F, Renou JP, Crespi M, Chan RL (2006) Cross-talk between ethylene and drought signalling pathways is mediated by the sunflower Hahb-4 transcription factor. *The Plant Journal*, 48, 125–137.

Manavella PA, Dezar CA, Ariel FD, Drincovich MF, Chan RL (2008) The sunflower HD-Zip transcription factor HAHB4 is up-regulated in darkness, reducing the transcription of photosynthesis-related genes. *Journal of Experimental Botany*, 59 (11), 3143–3155.

Marinho JP, Coutinho ID, Lameiro RF, Marin SRR, Colnago LA, Nakashima K, Shinozaki KY, Nepomuceno AL, Henning LMM (2019) Metabolic alterations in conventional and genetically modified soybean plants with GmDREB2A;2 FL and GmDREB2A;2 CA Transcription factors during water déficit. *Plant Physiology and Biochemistry*, 140, 122–135.

Marinho JP, Kanamori N, Ferreira LC, Pagliarini RF, Carvalho JFC, Freitas RA, Marin SRR, Rodrigues FA, Henning LMM, Farias JRB, Neumaier N, Oliveira MCN, Guimarães FCM, Yoshida T, Fujita Y, Shinozaki KY, Nakashima K, Nepomuceno AL (2015) Characterization of Molecular and Physiological Responses Under Water Deficit of Genetically Modified Soybean Plants Overexpressing the AtAREB1 Transcription Factor. *Plant Molecular Biology Reporter*, 34, 410–426.

Martignago D, Rico-Medina A, Blasco-Escámez D, Fontanet-Manzaneque JB, Caño-Delgado AI (2020) Drought Resistance by Engineering Plant Tissue-Specific Responses. *Frontiers in Plant Science* 10:1676.

Morgan PW, Drew MC (1997). Ethylene and plant responses to stress. *Physiologia Plantarum*, 100, 620–630.

Pagliarini R F, Ferreira LC, Rodrigues FA, Molinari HBC, Marin SRR, Molinari MDC, Marcolino-Gomes J, Mertz-Henning, LM, Farias JRB, Oliveira MCN, Neumaier N, Kanamori N, Fujita Y, Mizoi J, Nakashima K, Yamaguchi-Shinozaki K, Nepomuceno AL (2017) Characterization of Soybean Genetically Modified for Drought Tolerance in Field Conditions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1-15.

Riar MK, Cerezini P, Manandhar A, Sinclair TR (2018) Expression of Drought-Tolerant N₂ Fixation in Heterogeneous Inbred Families derived from PI471938 and Hutcheson Soybean. *Crop Science* 58, 364–369.

Ribichichi KF, Chiozza M, Britez SA, Cabello JV, Arce AL, Watson G, Arias C, Portapila M, Trucco F, Otegui ME, Chan R (2020) Successful field performance in warm and dry environments of soybean expressing the sunflower transcription factor HaHB4. *Journal of Experimental Botany*, 71 (10), 3142-3156.

Ritchie JT (1981) Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. *Plant and Soil*, 58, 81–96.

Rosa L, Rulli MC, Davis KF, Chiarelli DD, Passera C, Odorico P (2018). Closing the yield gap while ensuring water sustainability. *Environment Research. Letters*, 13, 104002.

Silva LS; Gatiboni LC (Org.) (2016) Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 11. ed. Santa Maria: SBCS, 1, 376 p.

Sentelhas PC, Battisti R, Câmara GMS, Farias JRB, Hampf AC, Nendel C (2015). The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *Journal of Agricultural Science*, 153, 1394–1411.

Sharp RE, LeNoble ME (2002) ABA, ethylene and the control of shoot and root growth under water stress. *Journal of Experimental Botany*, 53 (366), 33–37.

Sinclair TR (2020) “Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system” by J.T. Ritchie, *Plant and Soil* (1981). *Crop Science*, 1–3.

Sinclair TR, Ludlow MM (1986) Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. *Australian Journal Plant Physiology*, 13, 319-340.

Souza AT, Streck NA, Heldwein AB, Bisognin DA, Winck JEM, Rocha TSM, Zanon AJ (2014) Transpiration and leaf growth of potato clones in response to soil water deficit. *Scientia Agricola*, 71, 96-104.

Tagliapietra EL, Streck NA, Rocha TSM, Richter GL, Silva MR, Cera JC, Guedes JVC, Zanon AJ (2018) Optimum Leaf Area Index to Reach Soybean Yield Potential in Subtropical Environment. *Agronomy Journal*, 10 (3), 932-938.

Tagliapietra EL, Zanon AJ, Streck NA, Balest DS, Rosa SL, Bexaira KP, Richter GL, Ribas GG, Silva MR (2021) Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. *Agronomy Journal*, 113, 1882–1894.

Ullah A, Manghwar H, Shaban M, Khan AH, Akbar A, Ali U, Ali E, Fahad S (2014) Phytohormones enhanced drought tolerance in plants: a coping strategy. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 33103-33118.

Valliyodan B, Ye H, Song L, Murphy M, Shannon JG, Nguyen HT (2017) Genetic diversity and genomic strategies for improving drought and waterlogging tolerance in soybeans. *Journal of Experimental Botany*, 68 (8), 1835–1849.

Wu Y, Gong W, Wang Y, Yong T, Yang F, Liu W, Wu X, Du J, Shu K, Liu J, Liu C, Yang W (2018). Leaf area and photosynthesis of newly emerged trifoliolate leaves are regulated by mature leaves in soybean. *Journal of Plant Research*, 131, 1–10.

Zandalinas SI, Mittler R, Balfagon D, Arbona V, Gomez-Cadenas A (2018) Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures. *Physiologia Plantarum*, 162 (1), 2–12.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Identificamos oportunidades de melhorias no manejo das lavouras do RS, bem como as relações entre práticas de manejo com a produtividade. Essas informações podem servir de subsídios a produtores e técnicos para identificar práticas de manejo com maior retorno sobre investimento. Este é um dos poucos estudos em que resultados da simulação a nível de lavoura é integrado com informações de manejo para determinar os fatores responsáveis pela lacuna de produtividade e encontrar maneiras de reduzi-la.

Nossa análise aponta que a lacuna explorável ($L_{gxa} + L_m$) demoraria 38 anos para ser fechada se o aumento de produtividade ocorrer na mesma taxa em que ocorreu entre 2004 a 2021. Porém, o tercil superior das lavouras avaliadas já está com produtividade média semelhante ao PPIa, indicando que melhorias no manejo é uma forma de acelerar o fechamento da lacuna de produtividade do RS.

Nas lavouras avaliadas o déficit hídrico contribui com 43% da lacuna de produtividade total. O déficit hídrico é uma situação comum durante a produção de muitas culturas em regiões subtropicais, principalmente na América do Sul, que sofre forte influência do fenômeno ENOS e abrange uma área de aproximadamente 50 milhões de hectares de cultivo de soja. Em algumas regiões do Sul do Brasil, como na Metade Sul do Rio Grande do Sul, o cultivo de soja é incipiente e arriscado em função do baixo índice pluviométrico e o solo com baixa capacidade de armazenamento de água e, em anos de La Nina o déficit hídrico geralmente se agrava em toda a região subtropical podendo apresentar um considerável impacto negativo no crescimento e desenvolvimento das lavouras bem como nas economias locais, sendo o principal limitante da produtividade de soja no Brasil (SENTELHAS et al., 2015; ZANON; GRASSINI; STRECK, 2016).

A irrigação seria a estratégia mais viável a curto prazo para fechar a LPA, porém, além do alto investimento, problemas operacionais como acesso à água, licenciamento ambiental e acesso à energia impedem o aumento expressivo da área irrigada no RS. Os esforços do melhoramento para aumentar a tolerância das culturas ao estresse abiótico representam uma 'via amiga' para reduzir esta lacuna ocasionada pela deficiência hídrica (GONZALEZ et al., 2020). Diante disso, realizamos estudos na perspectiva da fisiologia

vegetal analisando genótipos transgênicos para tolerância a seca, principal fator limitante da produtividade de soja no Sul do Brasil.

A maioria dos genes envolvidos na resposta à seca estão relacionados ao fechamento estomático. Promover a expressão de genes que induzem o fechamento estomático, sob estresse leve e moderado, pode não ser uma característica desejável, pois em condições de campo essas condições de estresse são frequentes e podem resultar em menores produtividades em plantas com alta sensibilidade à redução do conteúdo de água do solo (SKIRYCZ et al., 2011). Porém, sob estresse severo um maior controle estomático pode ser favorável para manter a sobrevivência das plantas. Os genes HaHB4 e AtAREB possuem origens e local de atuação diferentes, consequentemente, as respostas fisiológicas diferem-se.

Plantas AtAREB de modo geral, apresentam maior tolerância a seca em função do crescimento mais lento, menor consumo diário de água e maior relação raiz/parte aérea, possibilitando as plantas manterem a atividade fotossintética por mais dias sob seca. Enquanto que a linhagem HaHb4 com maior tolerância apresentam maior EUA e alto valor de coeficiente de transpiração em ambiente irrigado. De modo geral, a estratégia para melhorar a tolerância à seca através de novos transgênicos mostrou resultados promissores. Sugerimos que próximos estudos conciliem ensaios de campo com estudos de variáveis fisiológicas em casa de vegetação, pois para que ocorra adoção da tecnologia pelos produtores as plantas transgênicas devem converter a maior tolerância a seca em maior produção de grãos comparado a cultivares comumente semeadas.

A capacidade de produzir mais com a mesma quantidade de água dos novos transgênicos resultará em benefícios para a sustentabilidade da lavoura de soja brasileira, com maior eficiência no uso de recursos e baixo impacto ambiental. Porém, apesar de tecnologias promissoras, as grandes dificuldades são o alto custo para agilizar e sincronizar os sistemas regulatórios globais. As previsões futuras de mudança climática (IPCC, 2021) indicam a necessidade de melhorar a eficiência no uso dos recursos hídricos em uma ampla gama de regiões propensas à secas permanentes e transitórias do mundo.

O potencial de produtividade de uma lavoura pode ser limitado pela disponibilidade hídrica e nutricional e reduzido na presença de estresses abióticos (como térmico e salinidade) e bióticos (pragas, doenças e plantas daninhas). Desta forma, o aumento da produtividade por práticas de manejo também está correlacionado com o aumento na eficiência do uso da água, desde que esta não seja limitante da produtividade. As diretrizes de manejo descritas nesta tese podem aumentar a produtividade de soja. Estudos futuros devem investigar o papel de fatores limitantes e redutores de produtividade e suas interações.

Na Figura 19 apresentamos o resultado das entrevistas a produtores, na safra 2020/2021, sobre sua percepção nos pontos a serem melhorados em suas lavouras.

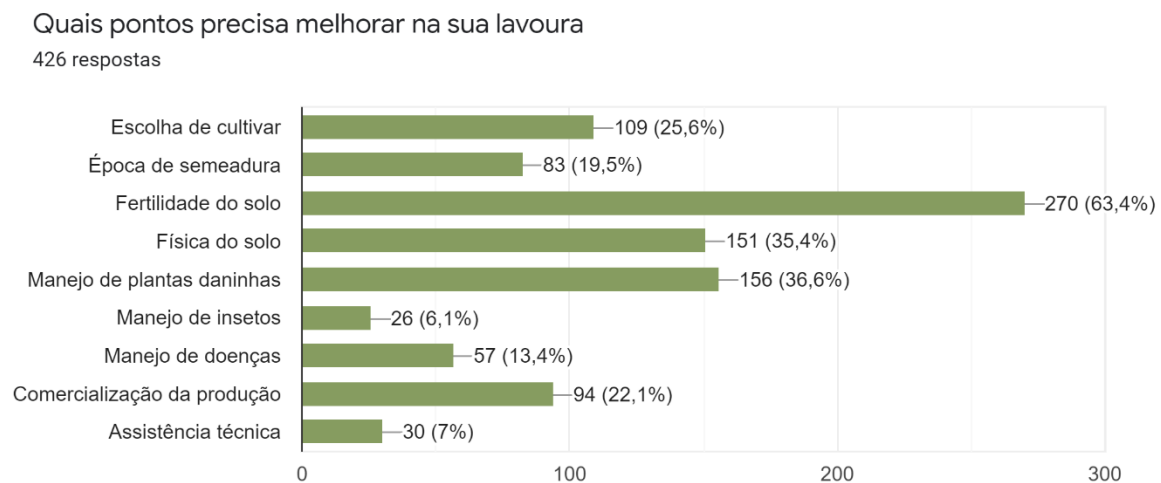


Figura 19. Pontos a melhorar nas lavouras de soja do RS, percepção de 426 produtores de soja na safra 2020/2021.

Essa análise serve de embasamento para investimentos em pesquisas voltadas para o produtor rural, ao ponto que uma melhor compreensão dos fatores socioeconômicos que afetam o manejo da lavoura é necessária.

5. REFERÊNCIAS

- AMIR, J.; SINCLAIR, T.R. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. *Field Crops Research*, v.29, p.59-96, 1991.
- ARBAGE, A. P. Fundamentos da Economia Rural. 2. ed Chapecó, SC: Argos, 2012, 307 p.
- BARBOSA, E.G.G et al. Overexpression of the ABA-Dependent AREB1 Transcription Factor from *Arabidopsis thaliana* Improves Soybean Tolerance to Water Deficit. *Plant Molecular Biology Reporter*, v. 31, n. 3, p. 719–730, 2014.
- BATTISTI R., SENTELHAS, P.C. New agroclimatic approach for soybean sowing dates recommendation: a case study. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, p.1149-1156, 2014.
- BEDDOW, J. et al. Rethinking Yield Gaps. Staff Paper Series, College of Food, Agricultural and Natural Resource Sciences, University of Minnesota, 2015, 44 p.
- BERLATO, M.A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D.C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade de milho no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.40, p.423-432, 2005.
- BINDI, M. et al. Influence of water deficit stress on leaf area development and transpiration of Sangiovese Grapevines grown in pots. *American Journal of Enology and Viticulture*, v.56, n.1, p.68-72, 2005.
- BOYER, J.S. Plant productivity and environment. *Science*, Washington, v.218, n.4571, p.443-448, 1982.
- CASSMAN, K. G. et al. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 28, n. 1, p. 315-358, 2003.
- CESB - COMITE ESTRATEGICO SOJA BRASIL. Disponível em:<<http://www.cesbrasil.org.br>>.
- CHOWDHURY, J.A. et al. Effect of drought stress on water relation traits of four soybean genotypes. *SAARC Journal of Agriculture*, v. 15, n. 13, 2018.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. A produtividade da soja: análise e perspectivas. *Compêndio de estudos Conab*. Brasília: v. 10, 2017.

CONAB. SÉRIE HISTÓRICA DAS SAFRAS. Companhia Nacional de Abastecimento, disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/serie-historica-das-safra?start=30>>, acesso em: 01/02/2022.

DEVKOTA, K.P. et al. Decomposing maize yield gaps differentiates entry points for intensification in the rainfed mid-hills of Nepal. *Field Crops Research*, v.179, p. 81–94, 2015.

DI MAURO, G. et al. Environmental and management variables explain soybean yield gap variability in Central Argentina. *European Journal of Agronomy*, v. 99, p. 186–194, 2018.

EVANS, L.T.; FISCHER, R.A. Yield Potential: Its Definition, Measurement, and Significance. *Crop Science*, v. 39, n.6, 1999.

FAO; DWFI. Yield gap analysis of field crops – Methods and case studies, by Sadras, V.O., Cassman, K.G.G., Grassini, P., Hall, A.J., Bastiaanssen, W.G.M., Laborte, A.G., Milne, A.E., Sileshi, G., Steduto, P. FAO Water Reports, n 41, Roma – Italia, 2015.

GONZALEZ, F.G., et al. An Interdisciplinary Approach to Study the Performance of Second-generation Genetically Modified Crops in Field Trials: A Case Study With Soybean and Wheat Carrying the Sunflower HaHB4® Transcription Factor. *Frontiers in Plant Science*, v.11, n.178, p. 1-15, 2019.

GRASSINI, P.; CASSMAN, K. High-yield maize with large net energy yield and small global warming intensity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 109, n.4, p.1074-1079, 2012.

GRASSINI, P. et al. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crops Research*, v. 177, p.49-63, 2015.

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Group II: Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021.

LAGO, I. et al. Transpiração e crescimento foliar de clones de batata em resposta à fração de água transpirável no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 745-754, 2012.

MARINHO, J.P. et al. Metabolic alterations in conventional and genetically modified soybean during water deficit. *Plant Physiology and Biochemistry*, v.140, p.122–135, 2019.

MARINHO, J.P. et al. Characterization of Molecular and Physiological Responses Under Water Deficit of Genetically Modified Soybean Plants Overexpressing the AtAREB1 Transcription Factor. *Plant Molecular Biology Reporter*, v. 34, p 410–426. 2016.

MARTINS, F.B. et al. Deficiência hídrica no solo e seu efeito sobre transpiração, crescimento e desenvolvimento de mudas de duas espécies de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.1297-1306, 2008.

MUCHOW, R.C.; SINCLAIR, T.R. Water deficits effects on maize yields modeled under current and “greenhouse” climates. *Agronomy Journal*, v.83, p.1052-1059, 1991.

PAGLIARINI, R.F. et al. Characterization of Soybean Genetically Modified for Drought Tolerance in Field Conditions. *Frontiers in Plant Science*; v. 8, p. 448, 2017.

PASUQUIN, J.M. et al. Closing yield gaps in maize production in South-east Asia through sitespecific nutrient management. *Field Crops Research*, v.156, p.219-230, 2014

PINHEIRO, D.G. et al. Limite crítico no solo para transpiração e crescimento foliar em mandioca em dois períodos com deficiência hídrica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 1740-1749, 2014.

PINHO, D.B.; VASCONCELOS, M.A.S. *Manual de Economia*. São Paulo: Saraiva, 2001. 652p.

PRINCE, S. J. et al. Root xylem plasticity to improve water use and yield in waterstressed soybean. *Journal of Experimental Botany*, v.68, p.2027-2036, 2017.

RIBEIRO, B.S.M.R. (org) et al. *Campeonato Soybean Money Maker : o segredo da lucratividade e sustentabilidade na lavoura de soja [recurso eletrônico]*. Santa Maria: [s. n.], 2021. 56 p.

ROLLA, A.A.P. et al. Phenotyping soybean plants transformed with rd29A:AtDREB1A for drought tolerance in the greenhouse and field. *Transgenic Research*; v. 23, n.1, p.75-87, 2014.

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.

Royal Society of London. *Reaping the Benefits: Science and the Sustainable Intensification of Global Agriculture*. Royal Society, London, 2009.

SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.2, n.3, p.287-294, 1998.

SENTELHAS, P.C., et al. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *Journal of Agricultural Science*, v. 153, p. 1394–1411, 2015.

SINCLAIR, T.R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production I. Model Development. *Field Crops Research*, v.15, p.125-141, 1986.

SINCLAIR, T.R.; LUDLOW, M.M. Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. *Australian Journal Plant Physiology*, v.13, p. 319-340, 1986.

SOUZA, A. T. et al. Transpiration and leaf growth of potato clones in response to soil water deficit. *Scientia Agricola*, v. 71, p. 96-104, 2014.

STRECK, N. A. et al. Simulating maize phenology as a function of air temperature with a linear and a non-linear model. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, p.449-455, 2008.

STRECK, N. A.; UHLMANN, L.O.; GABRIEL, L.F. Leaf development of cultivated rice and weedy red rice under elevated temperature scenarios. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, p.190-199, 2013.

STRECK, N.A. Do we know how plants sense a drying soil? *Ciência Rural*, v.34, p.581-584, 2004.

SKIRYCZ, A. et al. Survival and growth of Arabidopsis plants given limited water are not equal. *Nature Biotechnology*, v. 29, p. 212–214, 2011.

TAGLIAPIETRA, E.L., et al. Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. *Agronomy Journal*, v.113, p.1882–1894, 2021.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia Vegetal*. Editora Artmed, Porto Alegre, RS. 5ª ed. 2013.

VAN ITTERSUM, M.K.; et al. Yield Gap Analysis with Local to Global Relevance—A Review. *Field Crops Research*, v. 143, p. 4-17, 2013.

VAN ITTERSUM, M.K.; RABBINGE, R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, v. 52, p. 197–208, 1997.

VAN ITTERSUM, M.K. et al. Yield Gap Analysis with Local to Global Relevance—A Review. *Field Crops Research*, v. 143, p. 4-17, 2013.

VAN OORT, P.A.J. et al. Can yield gap analysis be used to inform R&D prioritisation?. *Global Food Security*, v.12, p.109–118, 2017.

WEISZ, R.; KAMINSKI, J.; SMILOWITZ, Z. Water deficit effects on potato leaf growth and transpiration: utilizing fraction extractable soil water for comparison with other crops. *American Potato Journal*, v.71, p.829-840, 1994.

WONG, S.C.; COWAN, I.R.; FARQUHAR, G.D. Leaf conductance in relation to rate of CO₂ assimilation. III. Influence of water stress and photoinhibition. *Plant Physiology*, Bethesda, v.78, n.4, p.830-834, 1985.

ZANON, A.J.; STRECK, N.A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. *Agronomy Journal*, v. 108, n.4, 2016.

6. ANEXOS

Anexo 1 – Modelo do questionário de entrevista aos produtores da safra 2020/2021



PROJETO POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE EM SOJA



Este projeto é uma iniciativa da Equipe FieldCrops juntamente com os parceiros: UFSM e EMATER-Ascar/RS.

O objetivo deste projeto é detectar práticas de manejo que estão proporcionando ganho de produtividade e lucro ao produtor para cada zona de manejo do Rio Grande do Sul.

As análises geradas com os dados deste questionário é de extrema importância para a sojicultura do RS, portanto necessitamos do correto e idôneo preenchimento do questionário sobre as práticas culturais, custos e lucratividade de cada lavoura.

Após a conclusão do projeto serão identificados os fatores de produção capazes de melhorar o rendimento econômico das lavouras de soja do Rio Grande do Sul. A divulgação dos resultados práticos deste projeto será através de dias de campo, redes sociais da Equipe FieldCrops (Facebook e Instagram) e palestras para produtores, extensionistas e consultores.

O QUESTIONÁRIO NÃO EXIGE A IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTOR. Caso o produtor queira uma análise do seu questionário (sobre o que faz de diferente das lavouras de maior produtividade?), pedimos que se identifique no questionário e entraremos em contato:

REGRAS PARA O PREENCHIMENTO DO QUESTIONÁRIO:

- Deve ser preenchido um questionário para cada lavoura (ou talhão);

- A profundidade do solo da lavoura deve considerar a profundidade efetiva (considerar a camada compactada);

- Os custos informados devem ser o mais próximo do real;

- Os custos de produção que não forem informados, serão estimados;

- Os custos podem ser informados em R\$/ha ou sc/ha, porém a unidade deve ser informada.

- No ITEM 41 deve-se informar quantas vezes o pulverizador (ou avião) fez aplicações na lavoura;

- Os fungicidas, inseticidas e herbicidas utilizados podem ser descritos nas OBSERVAÇÕES. Porém o número de aplicações de cada um deve ser informado no ITEM 38 e 39;

NOME DO APLICADOR:

NOME DO PRODUTOR:

Maiores esclarecimentos ligue para (55) 99675 5925

DADOS DA LAVOURA

1- Tamanho da lavoura (ha):

2- Latitude: Longitude:

3- Município:

4- Relevo da lavoura:
() Terras baixas (várzea) () Terras altas

5- Cultivar:

6- Data de semeadura: / /

7- Data da colheita: / /

8- Profundidade da camada compactada:

9- Qual a profundidade do solo da lavoura (camada arável + camada compactada / ou até a rocha):

() menor que 40 cm () maior que 40 cm

10- Quanto choveu na lavoura:

Nov	Dez	Jan	Fev	Mar

11- Produtividade (sc/ha):

12- Preço de venda (R\$/sc):

13- Custo de produção da soja (insumos+diesel, em considerar o arrendamento) (R\$ ou sc/ha):

14- A área é arrendada: () Sim () Não

15- Custo do arrendamento (sc/ha):

16- Mês de compra dos insumos:

17- Época de venda do produto:

() Contrato futuro () Troca

() Venda pós-colheita (informar o mês):

18- Modalidade de pagamento dos insumos:

() A vista () Troca por grãos (Barter)

() Prazo curto (até novembro)

() Prazo longo (safra) () Outro:

19- Espaçamento entre-linhas:

20- População estabelecida de plantas:

21- Utiliza semente certificada/fiscalizada:

() Sim () Não () Semente própria

22- Custo da semente (R\$/ha):

23- Utiliza qual tratamento de sementes:

() Inseticida () Fungicida () Inoculante

() Enraizador () Micronutriente:

24- Tratamento de sementes:

() *on farm* () TSI

25-Custo do tratamento de sementes (R\$/ha):

26- A semeadora possui:

- Haste sulcadora Disco turbo
 Disco liso Outro:

27 - Qual foi o sistema de preparo de solo na área:

- Direto (Não revolve o solo no verão e inverno).
 Convencional (Revolvimento após a colheita e/ou antes da semeadura)
 Escarificação

28- A área é calcariada: Sim Não

29- Aplica calcário de quanto em quanto tempo:
 anual 2 em 2 anos 3 em 3 +3 anos

30- Qual o custo do preparo do solo (calagem + descompactação) (R\$/ha):

31- Qual adubação de base (dose e fórmula):
a) Fórmula: _____ b) Dose (kg/ha): _____

32- Custo da adubação de base (R\$/ha):

33- Qual a adubação de cobertura:

a) Fórmula: _____ b) Dose(kg/ha): _____

34- Custo da adubação de cobertura (R\$/ha):

35 – A adubação é determinada por:
 Análise de solo Dose padrão

36 – Características do Solo

Ano da última análise:	
pH	
Fósforo (P)	
Potássio (K)	
Enxofre (S)	
MO (%)	
CTC (%)	
Al (%)	
Areia (%)	
Argila (%)	

37- Quantas aplicações foram feitas antes da semeadura da soja de:

- a) Herbicida (Manejo de inverno):
b) Herbicida (pré-plantio da soja):

38- Quantas aplicações foram feitas pós-semeadura da soja de:

- a) Herbicida: _____ Custo total(R\$/ha): _____
b) Inseticida: _____ Custo total (R\$/ha): _____
c) Fungicida: _____ Custo total (R\$/ha): _____
d) Nutrição foliar: _____ Custo total (R\$/ha): _____

Qual micronutriente:

39 – Estágio da 1ª aplicação de fungicida:

40- Quantas vezes o pulverizador entrou na área:

41 - Qual foi a forma de irrigação:
 Pivô Central Aspersão Sulco

42- Numero de irrigações ao longo do ciclo:

43- Milímetros irrigados ao longo do ciclo:

44- Estágio da planta no momento das irrigações:

45- Custo médio/irrigação (R\$/ha):

46- Qual a rotação de culturas (verão e inverno):

- a) Verão 2018/2019:
b) Inverno 2019:
c) Verão 2019/2020:
d) Inverno 2020:

47- Histórico da última cultura:

- a) Cultura:
b) Cultivar:
c) Produtividade:
d) Data de semeadura:
e) Data de colheita:
f) Adubação base+cobertura:

48- Em caso de lavoura-pecuária, informar quantos dias antes da semeadura da soja é retirado o gado da lavoura: _____ dias

49- Quantos dias o gado ficou na área: _____ dias

50- Qual a lotação média da área: _____ kg de boi por hectare

51 – Caso contrate serviços de terceiros:

a) Quantas aplicações foi terceirizado:

Qual o custo/ha de cada aplicação:

- b) Caso a colheita foi terceirizada, qual o custo/ha da colheita (R\$/ha ou sc/ha):

52- Enviar 1 kg de grãos/lavoura e amostra ou análise de solo

Produtos:	Fungicida	Inseticida
1ª aplicação:		
2ª aplicação:		
3ª aplicação:		
4ª aplicação:		