

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

LUCÉLIA DE SOUSA PAULA

**EFICIÊNCIA DA SELEÇÃO DIRETA E INDIRETA EM VARIÁVEIS
FOTOSSINTÉTICAS DE SOJA E SEUS IMPACTOS NA
PRODUTIVIDADE DE GRÃOS**

CHAPADÃO DO SUL – MS

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

LUCÉLIA DE SOUSA PAULA

**EFICIÊNCIA DA SELEÇÃO DIRETA E INDIRETA EM VARIÁVEIS
FOTOSSINTÉTICAS DE SOJA E SEUS IMPACTOS NA
PRODUTIVIDADE DE GRÃOS**

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Larissa Pereira Ribeiro Teodoro

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração: Produção Vegetal.

CHAPADÃO DO SUL – MS

2025



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

DISCENTE: Lucélia de Sousa Paula

ORIENTADORA: Dra. Larissa Pereira Ribeiro Teodoro

TÍTULO: Eficiência da seleção direta e indireta em variáveis fotossintéticas de soja e seus impactos na produtividade de grãos.

AVALIADORES:

Prof. Dra. Larissa Pereira Ribeiro Teodoro

Prof. Dr. Cid Naudi Silva Campos

Prof. Dr. Jorge Gonzalez Aguilera

Chapadão do Sul, 14 de novembro de 2025.

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Larissa Pereira Ribeiro, Professora do Magistério Superior**, em 14/11/2025, às 16:09, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Jorge González Aguilera, Usuário Externo**, em 14/11/2025, às 16:34, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Cid Naudi Silva Campos, Professor do Magisterio Superior**, em 14/11/2025, às 20:24, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

DEDICATÓRIA

A Deus

À minha mãe Rita Gonçalves

ao meu filho Pedro Menezes

ao meu esposo William Medeiros.

DEDICO

A todos meus amigos e familiares
que me ajudaram de alguma forma e
que estão sempre em minha vida.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

- Primeiramente, agradeço a Deus por ter me conduzido até aqui.
- À minha mãe Rita Gonçalves de Sousa, pela educação e o apoio durante toda a minha trajetória de vida e que esteve ao meu lado quando eu mais precisei.
- Ao meu filho Pedro Henrique Sousa de Menezes, que é o meu maior presente e a grande motivação para continuar nessa jornada.
- Ao meu esposo William Medeiros, que esteve ao meu lado me apoiando nos piores e melhores momentos, obrigada por não soltar minha mão, por acreditar em mim mesmo quando nem eu acreditei. Nada disso teria sentido sem você na minha vida.
- À minha avó Elita Gonçalves de Lira (*in memoriam*), pelo amor, carinho, companheirismo. Por acreditar em mim, me dizendo a nunca desistir e me proporcionar momentos inesquecíveis.
- Aos meus familiares que sempre acreditam em mim e que fizeram de tudo para que esse sonho tornasse realidade. Familiares que mesmo longe desejam que dê tudo certo.
- Aos amigos de curso Amanda, Marina, Izadora e Jhonantan que durante esses dois anos participaram de bons momentos de estudo e aprovações e que levo comigo em meu coração.
- À professora Dr^a. Larissa Pereira Ribeiro Teodoro, pela sua orientação, profissionalismo e paciência. Obrigada por acreditar em mim, e me ajudar tanto nessa caminhada. Sem dúvidas eu não chegaria até aqui sem seu apoio. Gratidão Eterna.
- Aos professores da pós-graduação Dr. Paulo Eduardo Teodoro e Dr. Cid Naudi Silva Campos da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, que me ajudaram de forma direta ou indiretamente na realização dessa dissertação e ao longo do mestrado.
- Aos membros da banca examinadora que gentilmente aceitaram a participar e colaborar com esta dissertação.
- Por fim, gratidão a todos que ajudaram para a realização desta dissertação. O meu mais sincero agradecimento.

EFICIÊNCIA DA SELEÇÃO DIRETA E INDIRETA EM VARIÁVEIS FOTOSSINTÉTICAS DE SOJA E SEUS IMPACTOS NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS

RESUMO: O melhoramento genético da soja busca constantemente por novas cultivares que permitam rendimentos mais elevados mesmo em cenários de estresses abióticos. No entanto, os programas de melhoramento decorrem da necessidade de alto custo e de longa duração para seleção de características desejáveis para o seu cultivo. Dentre os desafios de estratégias de seleção e obtenção de indivíduos superiores, a seleção direta e indireta para a produtividade de grãos, baseada em variáveis fotossintéticas, podem otimizar o processo de melhoramento genético devido à elevada eficiência na detecção e baixo custo, mesmo sob diferentes condições ambientais. Diante da crescente demanda e importância econômica da soja, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência da seleção direta e indireta em caracteres fisiológicos de soja e seus impactos na produtividade de grãos em duas safras. Foram avaliados 32 genótipos do programa do melhoramento genético da UFMS por delineamento experimental de blocos casualizados com quatro repetições. Foram mensuradas as variáveis fisiológicas associadas ao processo fotossintético, incluindo fotossíntese líquida (A), condutância estomática (g_s), concentração interna de CO_2 (C_i), transpiração (E) e eficiência no uso da água (WUE), e de produtividade de grãos (PROD). A análise estatística contemplou a estimativa de adaptabilidade e estabilidade pelo método de Lin e Binns modificado (Pim), herdabilidade, correlações de Pearson e ganhos dos seis melhores genótipos selecionados, visando identificar caracteres fisiológicos promissores como critérios indiretos de seleção para produtividade. Uma análise de componentes principais também foi realizada para verificar a inter-relação entre variáveis fisiológicas e safras para os genótipos de soja avaliados. Os resultados demonstraram ampla variabilidade genética entre os genótipos avaliados, o que confirma a viabilidade de utilização da seleção indireta no melhoramento da soja. Os caracteres A , g_s e C_i apresentaram herdabilidades moderadas a altas e correlação positiva com PROD, principalmente na safra conduzida sob condições adequadas de disponibilidade hídrica. A eficiência da seleção indireta em soja varia conforme as condições hídricas, onde g_s foi a variável fisiológica que apresentou maior estabilidade e correlação positiva com a produtividade de grãos, especialmente sob déficit hídrico. Essa característica destacou-se por sua elevada herdabilidade e ganhos genéticos consistentes, indicando potencial para uso como critério de seleção indireta em programas de melhoramento.

Palavras-chave: condutância estomática, ganho de seleção, *Glycine max*, herdabilidade, trocas gasosas.

EFFICIENCY OF DIRECT AND INDIRECT SELECTION IN PHOTOSYNTHETIC VARIABLES OF SOYBEAN AND THEIR IMPACTS ON GRAIN PRODUCTIVITY

ABSTRACT: Soybean breeding constantly seeks new cultivars that allow for higher yields even under abiotic stress scenarios. However, breeding programs are expensive and long-term, requiring the selection of desirable traits for cultivation. Among the challenges of selection strategies and obtaining superior individuals, direct and indirect selection for grain productivity, based on photosynthetic variables, can optimize the breeding process due to its high detection efficiency and low cost, even under different environmental conditions. Given the growing demand and economic importance of soybeans, the objective of this work was to evaluate the efficiency of direct and indirect selection for soybean physiological traits and their impacts on grain productivity in two agricultural seasons. Thirty-two genotypes from the UFMS breeding program were evaluated using a randomized block design with four replications. The physiological variables associated with the photosynthetic process were measured, including net photosynthesis (A), stomatal conductance (g_s), internal CO_2 concentration (C_i), transpiration (E), water use efficiency (WUE), and grain yield (PROD). Statistical analysis included the estimation of adaptability and stability using the modified Lin and Binns (Pim) method, heritability, Pearson correlations, and gains of the six best selected genotypes, aiming to identify promising physiological traits as indirect selection criteria for productivity. A principal component analysis was also performed to verify the interrelationship between physiological variables and crop productivity of the evaluated soybean genotypes. The results demonstrated wide genetic variability among the evaluated genotypes, confirming the viability of using indirect selection in soybean breeding. The traits A , g_s , and C_i showed moderate to high heritabilities and a positive correlation with productivity (PROD), mainly in the crop conducted under conditions of adequate water availability. The efficiency of indirect selection in soybeans varies according to water conditions, with g_s being the physiological variable that showed the greatest stability and positive correlation with grain yield, especially under water deficit. This trait stood out due to its high heritability and consistent genetic gains, indicating potential for use as an indirect selection criterion in breeding programs.

Keywords: gas exchange, *Glycine max*, heritability, selection gain, stomatal conductance.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1 Origem, desenvolvimento e importância econômica da soja	11
2.2 Exigências ecofisiológicas	12
2.3 Melhoramento genético da soja	13
2.4 Correlações em caracteres de soja.....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1 Localização e delineamento experimental.....	17
3.2 Condições climatológicas do experimento e exigências ecofisiológicas	17
3.3 Variáveis avaliadas	19
3.4 Análises estatísticas	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
5. CONCLUSÕES	35
6. REFERÊNCIAS	36

1. INTRODUÇÃO

O incremento na produtividade de grãos de soja tem sido amplamente associado aos avanços obtidos por meio do melhoramento genético e da adoção de práticas de manejo mais eficientes (WILSON et al., 2014). Esses progressos permitiram que a produtividade média no Brasil aumentasse de 1.748 kg ha⁻¹ em 1970 para 3.508 kg ha⁻¹ na safra 2022/23 e 3.201 kg ha⁻¹ na safra 2023/24 (CONAB, 2025). No entanto, apesar do crescimento contínuo nos rendimentos, o ganho genético atual ainda não é suficiente para atingir a meta estabelecida pela ONU de duplicar a produção global de alimentos até 2050 e para que essa meta seja alcançada, o ganho genético da oleaginosa deverá ser aumentado (RAY et al., 2013; JIANG et al., 2016). Nesse contexto, torna-se fundamental a mensuração e a identificação dos fatores determinantes do progresso genético, a fim de orientar e otimizar os programas de melhoramento.

A herdabilidade é um dos parâmetros genéticos que mais contribui para os trabalhos de melhoramento, surgindo para quantificar se as diferenças entre os indivíduos são de origem genética ou derivadas de fatores ambientais (HÜHN, 1975). Portanto, fornece a proporção da variância genética existente dentro da variância fenotípica total, estimando a confiabilidade do valor fenotípico como indicador do valor reprodutivo (LAWAL et al., 2025). Quando o valor de herdabilidade é alto, a seleção individual de plantas nas gerações iniciais é eficaz e com maior ganho genético. Quando valores baixos são demonstrados, a prática da seleção deve ser feita em gerações mais avançadas (CASTRO-URREA et al., 2023). No entanto, SILVA et al. (2021) afirmam que a elevada pressão de seleção nas gerações precoces com caracteres de alta herdabilidade pode ocasionar diminuição da variabilidade genética para outros caracteres que possuem baixa herdabilidade.

Em um cenário atual, o progresso genético e variáveis de herdabilidade na cultura da soja tem sido um dos principais responsáveis pelo aumento da produtividade nos últimos anos (ROGERS et al., 2015). Todavia, esse avanço também trouxe desafios relacionados à resistência de pragas e doenças, criando um cenário de desequilíbrio entre produtividade e sanidade vegetal (LI et al., 2017). Neste sentido, faz-se necessário a utilização de ferramentas que contribuam na eficiência da seleção direta e indireta dos caracteres fisiológicos na cultura da soja, bem como seus impactos na produtividade de grãos. Assim, possibilitando predição de fatores responsáveis pelo progresso genético e melhores estratégias de seleção dentro dos programas de melhoramento dessa cultura.

Estudos indicam que o progresso genético em soja está relacionado com a melhoria de diferentes variáveis fisiológicas, tais como a condutância estomática e o teor de clorofila, além de maior eficiência na absorção de nutrientes (MCFARLENE e O'CONNOR, 2014; ROCHE, 2015). DE FELIPE et al. (2016), constataram que existem diferenças expressivas na taxa fotossintética entre cultivares de soja, verificando que houve aumento da eficiência dessa variável e que este contribui para o aumento da produtividade de grãos. Dentre os desafios de estratégias de seleção e obtenção de indivíduos superiores com base na produção de grãos, as variáveis fotossintéticas propiciam características favoráveis devido à elevada eficiência na detecção e ao baixo custo (ZHANG et al. 2025). Além disso, o conhecimento do controle genético de tais características possibilitará estabelecer estratégias de cruzamentos e seleção de plantas agronomicamente superiores, e portadoras de genes com associação positiva entre o rendimento de grãos e variáveis fisiológicas (JIN et al., 2010).

A identificação de caracteres fotossintéticos associados à produtividade possibilita o uso da seleção indireta, permitindo a escolha de genótipos com base em variáveis de alta herdabilidade, fácil mensuração e relação funcional com o rendimento, mesmo sob condições ambientais adversas. Essa estratégia aumenta a eficiência e a precisão da seleção, além de reduzir custos e tempo de avaliação, favorecendo ganhos genéticos cumulativos em produtividade ao longo dos ciclos de melhoramento (NATARAJAN et al., 2019).

Devido à importância socioeconômica da cultura da soja, é necessário que tenham pesquisas sobre critérios de seleção indireta para caracteres agrônômicos utilizando variáveis fisiológicas. As hipóteses dessa pesquisa são: (i) a seleção indireta baseada em variáveis fotossintéticas apresenta herdabilidade comparável ou superior à seleção direta para produtividade de grãos em soja, (ii) a seleção em variáveis fisiológicas permite precisão, menor custo e maior rapidez na identificação de genótipos promissores para produtividade de grãos, em comparação com a seleção direta apenas por rendimento, (iii) qual ou quais variáveis fotossintéticas apresentam correlação genética positiva e significativa com a produtividade de grãos, e (iv) a eficiência da seleção indireta difere entre ambientes contrastantes quanto à disponibilidade hídrica.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar o ganho na seleção direta e indireta em variáveis fotossintética e seus impactos na produtividade de grãos soja em duas safras, bem como identificar as variáveis fisiológicas que proporcionam ganhos em produtividade ao praticar a seleção indireta.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Origem, desenvolvimento e importância econômica da soja

A soja é uma planta pertencente ao reino Plantae, divisão Magnoliophyta, classe Magnoliopsida (Dicotiledôneas), ordem Fabales, família Fabaceae (Leguminosae), subfamília Faboideae (Papilionoideae), gênero *Glycine* e espécie *Glycine max* (L.) Merrill (SEDIYAMA et al., 1985). É uma cultura milenar, hoje conhecida e cultivada em todo o mundo, em que apresenta características muito diferente dos ancestrais que consistiam em espécies de plantas rasteiras que se desenvolviam na costa leste da Ásia, principalmente ao longo do Rio Amarelo, na China (PETER et al., 2016; SEDIYAMA, 2009). A evolução desta espécie começou com o aparecimento de plantas oriundas de cruzamentos naturais, entre duas espécies de soja selvagem, que foram domesticadas e melhoradas por cientistas da antiga China (FARIAS et al., 2007; LEE et al., 2011). Os registros apontam que *G. max* tenha derivado de *G. gracilis*, que por sua vez tenha como ancestral *G. soja* (MISSÃO, 2006).

A soja é uma planta anual, autógama, herbácea, ereta, apresentando ampla variabilidade para as características morfológicas, que ainda podem ser influenciadas diversas condições ambientais (MATTOS et al., 2016). O seu ciclo, que corresponde ao número de dias da emergência até a maturação, pode levar de 75 para as cultivares mais precoces e 200 dias para as mais tardias (SEDIYAMA, 2009). O ciclo de um vegetal é afetado por vários fatores, sendo que os climáticos são os que mais alteram o desenvolvimento de uma cultura. Dentre esses, a disponibilidade hídrica, o fotoperíodo e a temperatura são os mais importantes por provocarem alterações qualitativas no ciclo da soja (FERRARI et al., 2015).

A oleaginosa reconhecida por sua elevada importância econômica e nutricional, consolidando-se como uma das culturas agrícolas mais relevantes no cenário mundial (HUANG et al., 2017). Trata-se de uma cultura com capacidade de produzir grãos ricos em proteínas e óleo de qualidade, atributos que conferem alta versatilidade de uso (XU et al., 2016). Além de ser matéria-prima para diversos produtos da indústria alimentícia, a soja é amplamente empregada na nutrição animal, na produção de biodiesel e como fonte de energia renovável (PI et al., 2016; PEREIRA et al., 2017).

No cenário global, os principais produtores são o Brasil e os Estados Unidos. Segundo USDA (2025), na safra 2023/24, o Brasil obteve a produção de 154,5 milhões de toneladas, e assim, consolidando o país como o primeiro maior produtor de soja do mundo e, conseqüentemente, correspondendo a 39% da produção global. Segundo estimativas da

Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (ONU), o Brasil tem potencial para assumir a liderança mundial na produção da oleaginosa nos próximos dez anos, onde até 2034 a demanda global deve crescer na ordem de 13% e a produção aproximadamente 14% (FAO, 2025). Dessa forma, o que influenciará na produção e principalmente o incremento de produtividade.

2.2 Exigências ecofisiológicas

Na germinação, tanto o déficit hídrico quanto o excesso podem prejudicar o desenvolvimento da soja, estabelecendo que o ideal é que a planta absorva 50% do seu peso em água para assegurar um bom desempenho (EMBRAPA, 2008). A cultura apresenta dois períodos críticos bem definidos com relação à deficiência de água, primeiramente da semeadura à emergência, e posteriormente durante o enchimento dos grãos, visto que estes envolvem diretamente a formação dos componentes do rendimento (STRECK; ALBERTO, 2006; ROCHA, 2009).

A planta de soja atinge a máxima exigência hídrica durante a floração e enchimento dos grãos, onde a demanda atinge 7 a 8 mm/dia, ocorrendo decréscimo da demanda após a fase de enchimento dos grãos (MINUZZI et al., 2010). No entanto, a ocorrência de déficit hídrico durante o período de enchimento dos grãos é mais prejudicial do que durante a floração. A necessidade total de água, para obtenção do máximo rendimento, ao que se refere à necessidade hídrica varia entre 450 e 800 mm/ciclo, dependendo das condições edafoclimáticas, do manejo da cultura e do ciclo da cultivar (EMBRAPA, 2008).

A soja é classificada como planta de dias curtos, apresenta alta sensibilidade ao fotoperíodo, onde o florescimento ocorre mesmo com condições de dia longo, tornando-se mais rápido à medida que os dias se tornam mais curtos (FERRARI et al., 2015). Contudo, existe uma ampla variabilidade genética de resposta às exigências de fotoperíodos entre cultivares. O fotoperíodo determina a indução ao florescimento, enquanto, a temperatura controla o florescimento (LAPERA; LIMA; VILARINHO, 2018). Em relação às exigências térmicas, a soja apresenta melhor adaptação em regiões onde as temperaturas oscilam entre 20°C e 30°C, sendo considerada a temperatura ideal em torno de 30°C (EMBRAPA, 2008). A temperatura do solo adequada é 25°C para uma emergência rápida e uniforme. A floração da soja somente é induzida quando ocorrem temperaturas acima da temperatura base, que é variável de cultivar para cultivar (MINUZZI et al., 2010; RODRIGUES et al., 2001).

2.3 Melhoramento genético da soja

O melhoramento genético da soja tem desempenhado papel central no aumento contínuo da produtividade de grãos, constituindo-se como um dos principais pilares para sustentar o avanço da produção em escala nacional e global. Esse progresso é impulsionado pela crescente demanda por alimentos, rações e biocombustíveis, o que reforça a necessidade de desenvolver cultivares mais produtivas, adaptadas e eficientes sob diferentes condições ambientais e sistemas de cultivo (ZHANG et al., 2022). Essa busca constante se deve, em grande parte, ao desenvolvimento de materiais genéticos adaptados a diferentes condições edafoclimáticas, o que possibilitou a ampliação da base genética da soja (CAIXETA et al., 2025). Assim como, a incorporação de genitores com diferentes origens e da formação de populações geneticamente distintas e divergentes. Essas estratégias visam aumentar a variabilidade nas gerações segregantes e, consequentemente, elevar a probabilidade de identificação e seleção de linhagens superiores, com maior potencial de adaptação e produtividade (MACHADO et al., 2017).

O principal objetivo dos programas de melhoramento genético é o desenvolvimento de cultivares que superem aquelas já disponíveis no mercado. Para isso, além de elevada produtividade, as novas cultivares devem apresentar bom desempenho agrônomo, resistência a pragas, doenças e herbicidas, bem como qualidade genética e fisiológica superior. Entretanto, incorporar características adicionais de forma simultânea representa um desafio constante, devido às correlações existentes entre os diferentes caracteres (SEDIYAMA et al., 2015). A estimativa de parâmetros genéticos como herdabilidade, correlações genéticas e fenotípicas e ganhos com a seleção, estão entre os mais importantes parâmetros em programas de melhoramento genético. A herdabilidade reflete a proporção do valor fenotípico que pode ser herdada, ou seja, quantifica a confiabilidade do valor fenotípico como guia para o valor genético (NOGUEIRA; SEDIYAMA; GOMES, 2015). De acordo com JOHNSON e BERNARD (1967) a herdabilidade faz parte da maioria das expressões empregadas no melhoramento genético, principalmente na predição de ganhos genéticos decorrentes de seleção.

A herdabilidade tende a apresentar valores mais elevados nas gerações iniciais de um programa de melhoramento, como F_2 , F_3 e F_4 , em virtude da maior variabilidade genética existente entre os indivíduos. À medida que o processo de endogamia avança, nas gerações mais tardias (F_6 , F_7 e F_8), essa variabilidade é reduzida, resultando em menores estimativas de herdabilidade (LAWAL et al., 2025). São nessas gerações mais avançadas que, geralmente,

ocorre a formação e a seleção das linhagens que darão origem às cultivares, momento em que a expressão dos caracteres tende a ser mais estável, porém com menor potencial de ganho genético pela seleção (CRUZ et al., 2017). No melhoramento genético de plantas, a identificação de genótipos superiores muitas vezes é dificultada pela baixa herdabilidade de determinados caracteres e pela complexidade na avaliação fenotípica (BORÉM; MIRANDA, 2017). Nesse contexto, o estudo das correlações entre caracteres torna-se uma ferramenta essencial, pois possibilita ao melhorista adotar estratégias de seleção indireta, ou seja, selecionar um determinado caráter com base em outro, geneticamente correlacionado e de maior herdabilidade.

Adicionalmente, os caracteres a serem escolhidos como alvos potenciais para seleção de plantas para maior rendimento ou estabilidade de rendimento em condições de estresse devem ser geneticamente correlacionados com a produtividade e apresentar maior herdabilidade que o rendimento em si (LI et al., 2017). Outros aspectos desejáveis referem-se à existência de variabilidade genética suficiente e ausência de caracteres indesejáveis relacionados aos principais componentes de rendimento (BORÉM; MIRANDA; FRITSCHENETO, 2021). Dessa maneira, é de interesse do melhorista optar preferencialmente pela mensuração daqueles que permitam sua quantificação de forma não destrutiva, com rápida obtenção, elevada acurácia e baixo custo.

2.4 Correlações em caracteres de soja

As condições ambientais podem favorecer determinados caracteres em detrimento de outros, uma vez que as variações de origem genética e ambiental resultam de mecanismos fisiológicos distintos, o que pode dificultar a eficiência da seleção indireta (MACHADO et al., 2017). No entanto, apenas as correlações de natureza genética possuem caráter hereditário e, portanto, podem ser exploradas de forma consistente em programas de melhoramento genético, o que reforça a importância de sua identificação e avaliação precisa (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012). Nesse conjunto, a determinação das variáveis fisiológicas correlacionadas com a produtividade de grãos torna-se essencial, pois permite identificar caracteres de maior controle genético e estabilidade, que podem ser utilizados como critérios indiretos de seleção para o aumento da eficiência produtiva da soja, especialmente em ambientes sujeitos a variações edafoclimáticas e estresses abióticos (CADAVID; BALBINOTT; MARGIS, 2023).

Determinados caracteres podem apresentar dificuldade de mensuração ou baixa herdabilidade, fatores que limitam a eficiência do processo seletivo em programas de melhoramento genético. Nesses casos, a utilização da seleção indireta constitui uma estratégia viável para a seleção de caracteres quantitativos, por meio da escolha de outros caracteres que apresentem correlação genética significativa com o traço de interesse (XIAO et al., 2012). Assim, o estudo das correlações entre caracteres permite compreender as respostas associadas, ou seja, as alterações que ocorrem em um caráter quando a seleção é aplicada sobre outro geneticamente correlacionado (MOFOKENG, 2021). A produtividade de grãos na soja apresenta geralmente baixa herdabilidade, pois é um caráter quantitativo complexo, influenciado por múltiplos genes de efeito pequeno e por fortes efeitos ambientais, incluindo disponibilidade hídrica, fertilidade do solo, manejo agrônomico e incidência de pragas e doenças. Essa elevada influência do ambiente reduz a proporção da variância genética na variação fenotípica total, tornando a seleção direta menos eficiente, especialmente em gerações segregantes (BORÉM; MIRANDA; FRITSCHÉ-NETO, 2021).

A identificação de variáveis fisiológicas correlacionadas com a produtividade é de fundamental importância no melhoramento genético de plantas diante do cenário de mudanças climáticas e, conseqüentemente, de estresses abióticos (ORT et al., 2017). Nestes cenários, a seleção indireta a partir de respostas dos caracteres fisiológicos permitem compreender os mecanismos fotossintéticos que sustentam o desempenho produtivo e direcionar a seleção de genótipos de forma mais eficiente (XAVIER et al., 2018). Dessa forma, as variáveis fisiológicas constituem ferramentas promissoras para a seleção indireta, permitindo ganhos genéticos mais precisos na predição de produtividade, mesmo em condições de ambientes contrastantes. Os caracteres fisiológicos pertencentes a dinâmica de trocas gasosas, como taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (g_s) e a eficiência no uso da água (WUE) frequentemente apresentam correlações genéticas positivas com o rendimento de grãos de soja (AINSWORTH et al., 2012; GAI et al., 2017; LI et al., 2017). LOPEZ et al. (2019), constataram correlações genéticas positivas e elevadas ($r \approx 0.8$) entre fotossíntese (A) e o rendimento de grãos em cultivares de soja, onde identificaram que A e a eficiência WUE são características fisiológicas que influenciam diretamente a produção de biomassa, a eficiência de conversão e o rendimento de grãos. Essa associação positiva também é apontada para outras culturas como o arroz, onde PENG et al. (2008) relataram maiores taxas fotossintéticas e características fisiológicas aprimoradas como contribuintes significativos para cultivares de alto rendimento. Resultados semelhantes foram apresentados por Panda (2018) em arroz,

DUVICK (2005) em milho, e por XIAO et al. (2012) em trigo. SHAHINNIA et al. (2016) encontraram uma associação genética positiva para características estomáticas e produtividade em trigo cultivado em ambientes de baixa pluviosidade. O estudo sugeriu que características, como a condutância estomática (g_s), podem ser um mecanismo subjacente de aumento do rendimento do trigo sob condições de déficit hídrico.

Em relação a herdabilidade das variáveis fisiológicas, os caracteres de A , g_s e concentração interna de CO_2 (C_i) frequentemente apresentam herdabilidade moderada a alta, refletindo maior controle genético e menor sensibilidade a variações ambientais. SOUZA (2016) identificou altos índices de herdabilidade para g_s e C_i nas culturas de *Saccharum spp.* e *Sorghum bicolor* sob condições de déficit hídrico. GAO et al. (2024) em estudo sobre a variação natural em plantas de *Hordeum vulgare*, os autores encontraram nos parâmetros relacionados à fotossíntese, herdabilidade (H^2) que variaram de 16% a 78%. Dois parâmetros relacionados ao fotossistema II, apresentaram herdabilidade moderada ($H^2=53\%$ a 58%) e indicaram correlações significativas com características relacionadas à produtividade. Esses resultados indicam a possibilidade de melhorar a produtividade das culturas por meio da otimização da eficiência do uso da luz fotossintética por programas de melhoramento convencional. RAMYA et al. (2021) afirmam que a condutância estomática (g_s) apresentam valores comumente de herdabilidade (H^2) entre 51% e 80% em diferentes espécies, apontando boa repetibilidade genética e potencial de seleção. Enquanto, as variáveis de transpiração (E) e eficiência do uso da água (WUE) apresentam herdabilidade variável, dependendo das condições ambientais. DE MIGUEL et al. (2012) encontraram herdabilidades moderadas a altas para g_s e baixa herdabilidade para WUE em *Pinus pinaster* quando submetidos ao déficit hídrico. PAULA et al. (2020) identificou herdabilidade elevada para E ($H^2=72.4\%$) e WUE ($H^2=77.2\%$) ao avaliar as trocas gasosas na seleção de populações de *Vigna unguiculata* em tolerância à seca.

Embora as variáveis de trocas gasosas na soja sejam documentadas, estudos sobre a eficiência na seleção indireta em variáveis fisiológicas e seus impactos na produtividade de grãos ainda são necessários para melhor compreensão inferências genéticas. Assim, ao se identificar esses caracteres fotossintéticos e comprovar sua correlação com a produtividade, é possível empregar a seleção indireta, isto é, selecionar genótipos com base em variáveis de fácil mensuração, alta herdabilidade e relação funcional com o caráter de interesse mesmo diante de diferentes condições ambientais adversas (CADAVID; BALBINOTT; MARGIS, 2023). Essa abordagem aumenta a precisão e a eficiência do processo seletivo, reduz o tempo

e o custo das avaliações de campo, além de favorecer os ganhos genéticos cumulativos em produtividade ao longo dos ciclos de melhoramento.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e delineamento experimental

O experimento foi conduzido nas safras 2022/23 e 2023/24 na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, localizada no município de Chapadão do Sul (18°41'33''S, 52°40'45''W, com 810 m de altitude), Mato Grosso do Sul. O clima da região é caracterizado como Tropical de Savana (Aw) de acordo com a classificação de Koppen e o solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico argiloso, representado pelas seguintes características na camada de 0 – 0,20 m: pH (H₂O) = 6,2; Al trocável (cmolc dm⁻³) = 0,0; Ca+Mg (cmolc dm⁻³) = 4,31; P (mg dm⁻³) = 41,3; K (cmolc dm⁻³) = 0,2; Matéria orgânica (g dm⁻³) = 19,74; V (%) = 45; m (%) = 0,0; Soma de bases (cmolc dm⁻³) = 2,3; CTC (cmolc dm⁻³) = 5,1. Foi utilizado delineamento de blocos casualizados com quatro repetições para a avaliação de 32 genótipos de soja do programa de melhoramento genético da UFMS. Cada parcela consistiu em cinco linhas de cinco metros com espaçamento de 0,45 m entre fileiras. O cultivo foi realizado por meio do sistema de plantio direto e com semeadura em outubro de 2022 e de 2023. As sementes foram tratadas com fungicida (Piraclostrobina + Metil Tiofanato) e inseticida (Fipronil), na dose de 200 mL do produto a cada 100 Kg de sementes. Além disso, realizou-se a inoculação das sementes com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, na dose de 200 mL de inoculante líquido concentrado a cada 100 kg de sementes para a fixação biológica de nitrogênio. Os tratos culturais posteriores ocorreram de acordo com as necessidades da cultura.

3.2 Condições climatológicas do experimento e exigências ecofisiológicas

A Figura 1A apresenta as condições de pluviosidade e temperatura média durante a safra 2022/23 e a Figura 1B a pluviosidade e temperatura média no decorrer da safra 2023/24. Observou-se que na safra 2022/23 (Figura 1A), ocorreu menor volume de chuvas no início da safra em outubro e durante o período vegetativo da cultura da soja, no entanto, entre os meses de dezembro a janeiro houve um progresso no índice pluviométrico, o que conferiu melhor distribuição hídrica durante a fase reprodutiva. Esse período coincidiu também com a maior necessidade hídrica da cultura, em que volume foi de aproximadamente 800 mm, sendo

adequado para atender a necessidade da cultura nessa fase, e classificada como balanço hídrico adequado (Safr 1).

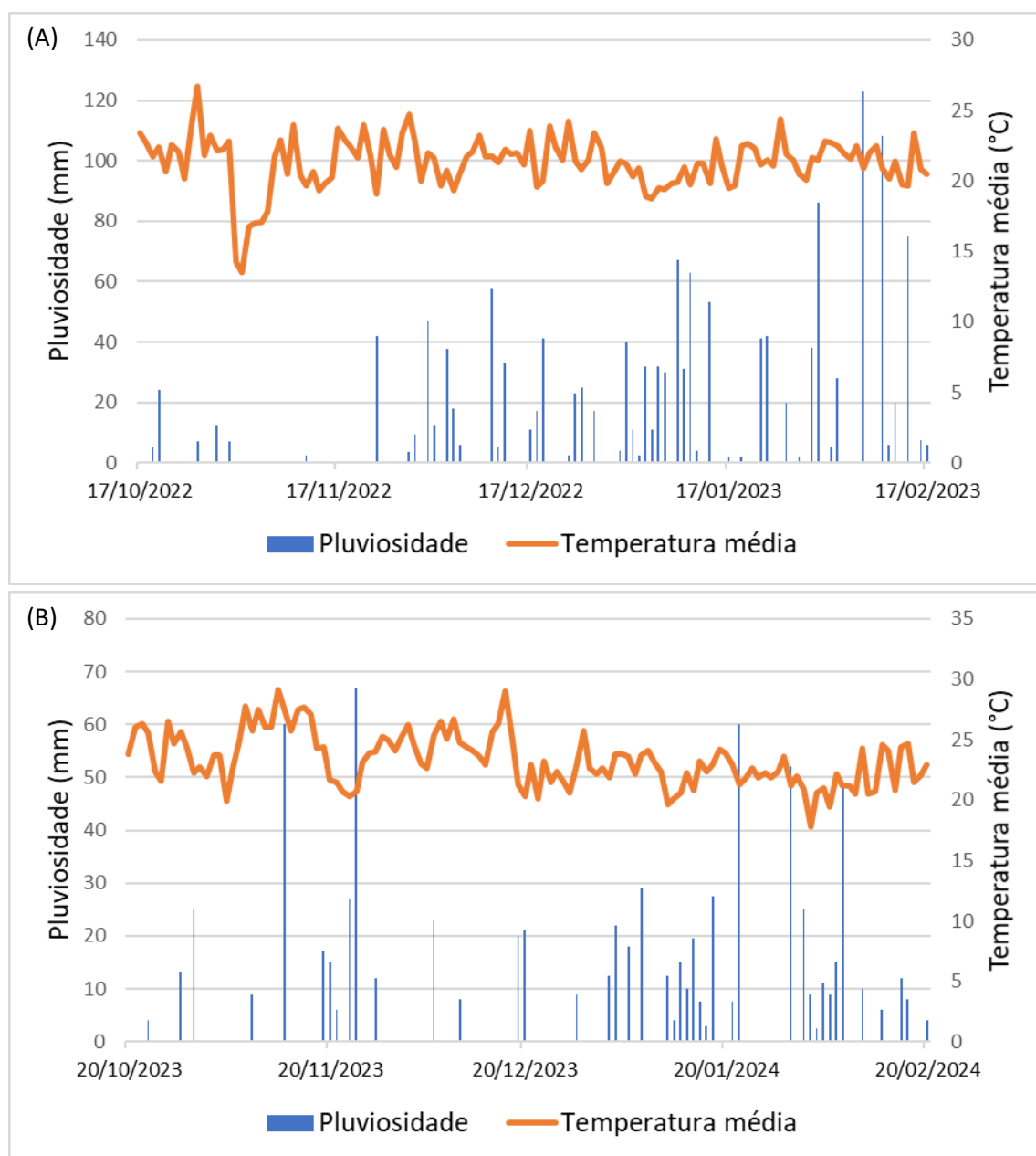


Figura 1: Condições de pluviosidade e temperatura média durante a safra 2022/23 (A) e safra 2023/24 (B).

Enquanto, durante a safra 2023/24 (Figura 1B), houve um maior fornecimento pluviométrico no início do período vegetativo da cultura da soja em novembro quando comparada a safra anterior, porém entre os meses de dezembro e janeiro houve decréscimo no volume hídrico quando comparado ao mesmo período do ano anterior. Esse cenário apresentou alternância entre chuvas mais volumosas e períodos de estiagem durante a fase

reprodutiva, em meados do mês de dezembro, configurando um ciclo mais instável e com a volume total abaixo da exigência hídrica para a cultura nessa fase, sendo descrita como déficit hídrico (Safrá 2). As análises das variáveis fisiológicas foram realizadas no mesmo período para as duas safras, aproximadamente dia 20 de dezembro, onde nos dias que antecedem a avaliação, constatou-se que as condições de pluviosidade e disponibilidade hídrica para a cultura estavam adequadas e, assim, em condições semelhantes para a leitura das variáveis.

3.3 Variáveis avaliadas

As avaliações foram realizadas cerca de 60 dias após a semeadura (DAS) em meados do mês de dezembro para as duas safras estudadas. As variáveis fisiológicas foram analisadas utilizando um analisador de fotossíntese portátil (Infrared Gas Analyzer - IRGA) modelo Li-6400XT (LiCor Inc., Lincoln, Nebraska, USA), seguindo os procedimentos descritos em Teodoro et al. (2019). Foi utilizado o fluxo de fótons fotossinteticamente ativos de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e concentrações de CO_2 ambiente ($372 \pm 10 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Teodoro et al., 2019). As variáveis avaliadas foram: fotossíntese líquida (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$), transpiração (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 (C_i , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) e eficiência no uso da água (WUE, $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$), este último estimado pela razão entre fotossíntese líquida e transpiração ($\text{WUE} = A/E$).

As medições foram realizadas entre às 8:00 e 11:00 horas da manhã em três plantas amostradas aleatoriamente em cada unidade experimental com umidade relativa entre 50 e 80%, conforme realizado por Teodoro et al (2019). Como padrão foram utilizadas a terceira folha completamente desenvolvida a partir do ápice da planta, a qual é considerada diagnóstico para análises nutricionais em soja (PRADO, 2021). A produtividade de grãos (PROD) foi avaliada pela colheita de 1 m de plantas no centro de cada unidade experimental. Posteriormente, as plantas foram monitoradas. A umidade de cada parcela foi corrigida para 13% e os valores extrapolados para kg ha^{-1} .

3.4 Análises estatísticas

Inicialmente, foi realizada análise de variância (ANOVA) individual para cada ambiente (ano), seguida de análise de variância conjunta conforme modelo estatístico descrito na Equação 1:

$$Y_{ijk} = \mu + B/E_{jk} + G_i + E_j + G \times E_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

onde: Y_{ijk} é a observação do k-ésimo bloco avaliado no i-ésimo genótipo e j-ésimo ano; μ é a média geral dos experimentos; B/E_{jk} é o efeito do bloco k dentro do ano j; G_i é o efeito do i-ésimo genótipo considerado aleatório; E_j é o efeito do j-ésimo ano considerado fixo; $G \times E_{ij}$ é o efeito aleatório da interação entre o genótipo i e o ambiente j; e ε_{ijk} é o erro aleatório associado à observação de Y_{ijk} . Em seguida, foi calculada a estimativa de adaptabilidade e estabilidade (P_i) proposta por Lin e Binns (1988) para cada caráter de acordo com a Equação 2:

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^e (Y_{ij} - Y_{mj})^2}{2e} \quad (2)$$

onde Y_{ij} é a pontuação do i-ésimo genótipo no j-ésimo ano; Y_{mj} é a estimativa do genótipo hipotético ideal no ano j; e e é o número de anos. Para a seleção dos genótipos, foi utilizada a estatística multivariada P_{im} , conforme a Equação 3:

$$P_{im} = \sum_{k=1}^v \left[\frac{P_{ik}}{\hat{\sigma}_{P_{ik}}} \right] \quad (3)$$

onde: P_{ik} é o estimador univariado da adaptabilidade e estabilidade do i-ésimo genótipo associado à k-ésima variável, P_{ifk} é o estimador univariado da adaptabilidade e estabilidade do i-ésimo genótipo em safras agrícolas associado à k-ésima variável, e $\hat{\sigma}_{P_{ik}}$ é o desvio-padrão de P_{ik} . Após a seleção dos genótipos com menores valores de P_{im} , foram obtidas as estimativas dos ganhos genéticos (g_s), com intensidade de seleção (IS) de 20%, para cada caráter e ano, conforme a Equação 4:

$$GS_{(\%)} = \frac{(X_s - X_o) \times h^2}{X_o} \quad (4)$$

onde X_s é a média do caráter para os seis genótipos selecionados, X_o é a média original do caráter e h^2 é a herdabilidade ampla do caráter.

Para gerar os grupos de genótipos a serem classificados, os dados foram submetidos a análise de componentes principais (PCA). Foi construído um biplot com os dois primeiros componentes principais devido a facilidade de interpretação destes resultados. Neste biplot, foram definidos dois clusters (1 e 2) com base no desempenho dos genótipos para as variáveis fisiológicas com utilização do algoritmo k-means, que agrupa tratamentos cujos centroides estão mais próximos até que não ocorra variação significativa na distância mínima de cada observação a cada um dos centroides. Essas análises foram realizadas com auxílio do pacote “ggfortify” do software R (BUNN, 2008).

As correlações de Pearson (r) entre os caracteres avaliados foram estimadas utilizando a Equação 2.

$$r = \frac{COV_{(xy)}}{\sqrt{\delta_x^2 * \delta_y^2}} \quad (2)$$

Em que: $COV_{(xy)}$ é a covariância entre os caracteres X e Y, δ_x^2 é a covariância do caráter X e δ_y^2 é a variância do caráter Y. Um gráfico de correlações e dispersão foi utilizado para expressar as correlações entre as variáveis fisiológicas e os clusters formados, além das correlações entre as variáveis fisiológicas utilizadas. Uma rede de correlações foi utilizada para expressar graficamente a relação funcional entre as variáveis bandas espectrais, índices de vegetação e caracteres fisiológicos, onde a proximidade entre os nós (linhas) são proporcionais ao valor absoluto da correlação entre esses nós. A espessura das arestas foi controlada pela utilização de um valor de corte igual a 0,6, significando que apenas $|r| \geq 0,60$ tiveram suas linhas destacadas, sendo as correlações positivas em verde e as correlações negativas representadas em vermelho.

As análises de adaptabilidade e estabilidade e as estimativas de variáveis genéticas e de ganhos de seleção foram realizadas com o software Genes (CRUZ, 2013), enquanto os gráficos obtidos para as análises de PCA e correlações foram gerados no software R (Team, 2013).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta o resumo da análise de variância para seis variáveis, fotossíntese líquida (A), condutância estomática (g_s), concentração interna de CO_2 (C_i), transpiração (E),

eficiência no uso da água (WUE) e produtividade de grãos (PROD) avaliados em 32 genótipos de soja em duas safras. Os caracteres A , C_i , WUE e PROD apresentaram efeito genotípico significativo ($p < 0,05$), indicando variabilidade genética expressiva entre os genótipos para essas variáveis (Tabela 1). Esses resultados demonstram a presença de variabilidade genética que reforça o potencial de seleção indireta das caracteres fisiológicos e favorece o avanço genético da população. Enquanto o efeito significativo para PROD reforça o potencial de seleção direta para rendimento. HOSSAIN et al. (2024) relataram diferenças significativas entre genótipos nas medições de trocas gasosas (A , g_s , C_i , E) e na WUE sob diferentes níveis de estresse hídrico, onde identificaram genótipos mais tolerante sob condições de déficit hídrico com melhor desempenho fisiológico para A , WUE e na produtividade. Em contraste, SILVA et al. (2024) encontraram diferenças significativas entre genótipo tolerantes e sensíveis em A , g_s e E quando submetidos a estresse por excesso hídrico, demonstrando variabilidade genética para resposta fisiológica. ALZHRANI (2024) ao avaliar o potencial de tolerância à seca e à salinidade de genótipos de soja com base em indicadores bioquímicos, fisiológicos e genéticos, identificou diferenças significativas entre genótipos em A , g_s e WUE, e destacando genótipos promissores para tolerância combinada.

Para g_s e E não houve diferenças significativas entre genótipos, sendo este resultado atribuído a magnitude da interação GxE e, conseqüentemente, sugerindo que essas variáveis são mais influenciadas por fatores ambientais e podem apresentar menor controle genético sob as condições avaliadas. O efeito da safra foi altamente significativo para todas as variáveis (Tabela 1), exceto para a E , destacando uma forte influência ambiental sobre o desempenho fisiológico e produtivo de acordo com a safra avaliada. Adicionalmente, observou-se que C_i e PROD são altamente sensíveis às variações entre safras, provavelmente devido a diferentes condições ambientais que ocorreram durante o estudo. O coeficiente de variação (CV) foi considerado moderados (Tabela 1), variando de 11,98% (C_i) a 28,41% (PROD), refletindo a complexidade da resposta fisiológica e agrônômica em campo. Esses resultados inferiores a 30% são semelhantes aos obtidos em outros estudos com a cultura da soja (ZEBA et al., 2022). COTRIM et al. (2020) ao avaliarem o desempenho fisiológico de genótipos de soja cultivados em condições irrigadas e de sequeiro, constataram coeficiente de variação (CV) inferior a 20% para todas as variáveis fisiológicas analisadas e de produtividade, corroborando com os resultados dessa pesquisa.

Tabela 1. Resumo da análise de variância para as variáveis fotossíntese líquida (A), condutância estomática (g_s), concentração interna de CO_2 (C_i), transpiração (E), eficiência no uso da água (WUE) e produtividade de grãos (PROD) avaliados em 32 genótipos de soja em duas safras.

Fonte de variação	GL	A	g_s	C_i	E	WUE	PROD
Bloco							
Genótipos		306,24*	0,39*	5594,24*	35,93*	9,74*	5640316,16*
(G)	3	24,35*	0,02 ^{ns}	2808,33*	3,01 ^{ns}	4,93*	4612990,46*
Safras (S)	31	9368,67*	0,31*	511696,11*	212,46 ^{ns}	41,06*	286826381,23*
GxS	1	49,62*	0,06*	3122,94*	9,11*	8,39*	2389916,59*
Resíduo	31	13,92	0,01	946,20	3,00	1,42	627175,49
CV (%)	186	12,32	21,27	11,98	24,67	27,57	28,41
Média geral		30,26	0,53	256,78	7,02	4,33	2787,44

^{ns} e *: não significativo e significativo a 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. CV: coeficiente de variação; GL: graus de liberdade.

Para g_s e E não houve diferenças significativas entre genótipos, sendo este resultado atribuído a magnitude da interação GxE e, conseqüentemente, sugerindo que essas variáveis são mais influenciadas por fatores ambientais e podem apresentar menor controle genético sob as condições avaliadas. O efeito da safra foi altamente significativo para todas as variáveis (Tabela 1), exceto para a E , destacando uma forte influência ambiental sobre o desempenho fisiológico e produtivo de acordo com a safra avaliada. Adicionalmente, observou-se que C_i e PROD são altamente sensíveis às variações entre safras, provavelmente devido a diferentes condições ambientais que ocorreram durante o estudo. O coeficiente de variação (CV) foi considerado moderados (Tabela 1), variando de 11,98% (C_i) a 28,41% (PROD), refletindo a complexidade da resposta fisiológica e agrônômica em campo. Esses resultados inferiores a 30% são semelhantes aos obtidos em outros estudos com a cultura da soja (ZEBA et al., 2022). COTRIM et al. (2020) ao avaliarem o desempenho fisiológico de

genótipos de soja cultivados em condições irrigadas e de sequeiro, constataram coeficiente de variação (CV) inferior a 20% para todas as variáveis fisiológicas analisadas e de produtividade, corroborando com os resultados dessa pesquisa.

Houve interação significativa de GxS para todas as variáveis, até mesmo para aquelas sem efeito genotípico isolado (g_s e E), sugerindo a expressão semelhante dos genes que controlam os caracteres nas duas safras, além de que os genótipos respondem de forma diferenciada em relação a condições ambientais. Essa interação significativa ressalta a necessidade de avaliações de diferentes ambientes para seleção eficiente dos genótipos (COTRIM et al., 2020). Diante deste contexto, na Tabela 2 foram estimados os índices de herdabilidade e ganho de seleção direta dos seis melhores genótipos selecionados para as variáveis fisiológicas ao longo de duas safras e suas respectivas produtividades de grãos. As estimativas dos caracteres genéticos de herdabilidade e ganho de seleção permitem melhor compreender a estrutura genética da população e inferir sobre a variabilidade genética presente nela, fornecendo subsídios para prever os ganhos genéticos e o possível sucesso no programa de melhoramento genético (CRUZ et al., 2012).

Para a Safra 1, A , g_s , E , e WUE apresentaram herdabilidade acima de 70%, considerada alta (Tabela 2). Enquanto na Safra 2, com exceção da WUE, cuja herdabilidade foi de 76,69%, todas as demais características avaliadas apresentaram baixa herdabilidade, já que sob déficit hídrico ocorre maior interferência do ambiente. A alta herdabilidade para WUE sugere maior influência de fatores genéticos no controle do caráter, resultando em maior eficiência de seleção de genótipos para esse caráter. Conforme a safra 1, em anos com distribuição adequada das chuvas, a WUE é elevada nas plantas. A elevada eficiência no uso da água (WUE) pode ser atribuída a maior taxa fotossintética e menor transpiração. A relação entre a fotossíntese e transpiração resultará na WUE (BERTOLLI et al., 2012), sendo uma variável fisiológica que descreve quantitativamente o desempenho momentâneo das trocas gasosas na folha (DA SILVA et al., 2008), e evidencia a eficiência com que a planta utiliza o recurso de água (BLUM, 2005). Portanto, corroborando com os resultados descritos para os genótipos selecionados descritos na Tabela 2. Dessa forma, a alta herdabilidade para WUE indica a seleção de genótipos de soja com maior precisão a partir dos valores fenotípicos observados para diferentes condições de ambiente, onde grande parte da variação fenotípica é de origem genética, o que acelera o potencial de ganho genético por geração e aumenta a eficiência da seleção (ZEBA et al., 2022).

Tabela 2. Ganhos com a seleção direta dos seis melhores genótipos para cada variável fisiológica e reflexos sobre a sua produtividade de grãos.

Variável ¹	Safr	Média		Herdabilidade ---(%)---	Ganho	Produtividade de grãos (kg ha ⁻¹)	
		Geral	Selecionados			Geral	Selecionados
<i>A</i>	1	24,21	25,41	77,43	4,98	3845,94	3982,82
	2	36,31	37,27	39,70	2,65	1728,95	1757,76
<i>g_s</i>	1	0,57	0,57	77,22	0,66	3845,94	3928,52
	2	0,50	0,56	55,07	12,08	1728,95	1851,52
<i>C_i</i>	1	301,49	304,32	57,53	0,94	3845,94	4012,68
	2	212,08	244,70	69,37	15,38	1728,95	1798,00
<i>E</i>	1	6,12	6,27	78,01	2,52	3845,94	3925,11
	2	7,94	8,61	42,76	8,39	1728,95	1706,46
WUE	1	3,93	3,42	87,07	-13,21	3845,94	3784,59
	2	4,73	7,13	76,69	50,87	1728,95	1509,37

¹: fotossíntese líquida (*A*, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração (*E*, $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (*g_s*, $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração interna de CO₂ (*C_i*, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) e eficiência no uso da água (WUE, $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$).

Por outro lado, a herdabilidade relativamente baixa de *A* na safra 2 (39,70%) indica maior influência ambiental e genótipos menos diferenciados sob as condições analisadas (Tabela 2). Além disso, observou-se que a variável *E* apresentou alta herdabilidade (78,01%) na safra 1 e uma baixa (42,76%) na safra 2, sendo influenciada tanto pela variação genotípica quanto pela interação com o ambiente. Os maiores ganhos relativos com a seleção foram registrados para WUE na safra 2, com um aumento expressivo de 50,87%, seguido por *C_i* na mesma safra, com 15,38%, e *g_s* também na safra 2, com 12,08%, sendo essas variáveis relacionadas a capacidade fisiológica de resposta estomática e que sofrem alterações sob condições de estresses abióticos (Tabela 2). Esses dados indicam que sob condições ambientais desfavoráveis, os caracteres de eficiência no uso da água (WUE) e concentração interna de CO₂ (*C_i*) desempenham um papel mais relevante na diferenciação dos genótipos. Apesar dos altos ganhos genéticos em variáveis fisiológicas, os impactos sobre a

produtividade de grãos foram variados (Tabela 2). Assim, a seleção com base em C_i na safra 1 promoveu o maior incremento produtivo ($4012,68 \text{ kg ha}^{-1}$), mesmo com moderado ganho genético (0,94%). Dessa forma, sugerindo uma forte associação fisiológica entre o aumento da assimilação interna de carbono e a eficiência produtiva sob ambientes mais favoráveis (SUO et al., 2024).

A g_s destacou-se como uma das variáveis fisiológicas mais consistentes entre as safras, apresentando elevada herdabilidade (77,22%) e ganho de seleção positivo (0,66) na safra 1, associada à alta produtividade de grãos ($3928,52 \text{ kg ha}^{-1}$) em condições de balanço hídrico adequado, principalmente no período de enchimento de grãos. Na safra 2, mesmo sob restrição hídrica, a variável manteve desempenho satisfatório, com herdabilidade moderada (55,07%), ganho de seleção expressivo (12,08) e produtividade de $1851,52 \text{ kg ha}^{-1}$. Esses resultados evidenciam a estabilidade genética da g_s e sua sensibilidade adaptativa frente à variação ambiental, indicando que a seleção baseada nesse caráter pode proporcionar ganhos genéticos consistentes em diferentes condições hídricas. Além disso, embora os caracteres C_i e WUE, também tenham apresentado ganhos de seleção expressivos na safra 2 (15,38 e 50,87, respectivamente), a g_s foi mais equilibrada entre as duas safras, refletindo maior controle genético e menor suscetibilidade a variações de disponibilidade hídrica. Essa estabilidade sugere que a g_s pode ser um indicador fisiológico robusto para seleção indireta de genótipos superiores, uma vez que está relacionada à taxa fotossintética e à eficiência no uso da água, influenciando diretamente o acúmulo de assimilados e, consequentemente, o rendimento de grãos.

RAMYA et al. (2021) ao estudarem ação gênica que governa a herança da g_s em *Triticum aestivum* sob condição de estresse de alta temperatura, identificou que os caracteres estomáticos têm predominância de ação gênica aditiva e repetibilidade, evidenciando que g_s apresenta componente genético explorável por seleção e potencial para ganhos em programas de melhoramento. De acordo com REBETZKE et al. (2003), a g_s apresenta herdabilidade razoavelmente alta, com valores relatados tipicamente na faixa de 50%–80%, o que a torna uma variável promissora para seleção indireta em programas de melhoramento genético voltados à produtividade e à tolerância a estresses abióticos. Adicionalmente, BASNAYAKE et al. (2015), também reportaram alta herdabilidade em *Saccharum officinarum* para g_s na seleção de genótipos em ambientes sob deficiência hídrica. LOPEZ et al. (2021) ao pesquisarem sobre estabilidade genética de caracteres fisiológicos em novas cultivares em soja, constataram alta correlação genética entre g_s e WUE com a produtividade. Enquanto Wu

et al. (2019) concluem que o aumento da fotossíntese no rendimento depende fortemente do grau de limitação hídrica, identificando alta correlação entre A e g_s , e portanto, sendo estes caracteres um fator-chave para quantificar os impactos do aumento no rendimento das culturas. Assim, g_s está diretamente relacionada à WUE e à A , sendo um indicador da eficiência fisiológica e adaptabilidade de genótipos sob diferentes condições ambientais.

Com base nesse contexto, os resultados indicam que a condutância estomática desempenha papel estratégico na manutenção do equilíbrio fisiológico da planta, especialmente em cenários contrastantes de disponibilidade hídrica. A seleção de genótipos com maior g_s pode, portanto, contribuir para o melhoramento de cultivares mais produtivas e eficientes sob diferentes condições ambientais, fortalecendo o uso da seleção indireta baseada em parâmetros fisiológicos de alta herdabilidade e impacto sobre a produtividade. A mensuração da g_s é comumente realizada por meio do porômetro foliar portátil, um instrumento que estima a taxa de difusão de vapor d'água através dos estômatos a partir da diferença de umidade entre a folha e a câmara do equipamento (BASAL; MUNKHBAT; VERES; 2024). Essa técnica possibilita medições rápidas, não destrutivas e de alta precisão, permitindo a avaliação eficiente de muitos genótipos em campo (RAMYA et al., 2021). A utilização do porômetro se destaca pelo baixo custo, facilidade operacional e técnica (REYNOLDS et al., 2012) constituindo uma alternativa promissora para estudos ecofisiológicos e para a seleção indireta de genótipos superiores quanto à produtividade e adaptação em programas de melhoramento genético da soja.

A seleção com base em WUE na safra 2, embora tenha apresentado o maior ganho fisiológico (50,87%), resultou em uma redução na produtividade de grãos (1509,37 kg ha⁻¹), o que evidencia um possível *trade-off* ou um equilíbrio entre eficiência fisiológica e produção final em condições de estresses abióticos (HOSSAIN et al. 2024). O *trade-off* refere-se a uma relação de compensação entre duas características que podem não se expressar simultaneamente. No caso da seleção com base em WUE, o aumento da eficiência fisiológica ocorreu à custa da redução da produtividade de grãos, indicando que ganhos em determinada característica (WUE), podem implicar perdas em outro caractere, como produção, especialmente sob cenários de déficit hídrico. Contudo, a fotossíntese líquida (A) apresentou ganhos positivos entre as safras (Tabela 2), com aumentos fisiológicos de 4,98% e 2,65% nas safras 1 e 2, respectivamente, acompanhados de incrementos na produtividade, apesar de moderados. Esse padrão sugere que a taxa fotossintética líquida, assim como a g_s , tem bom desempenho com o rendimento. A taxa fotossintética líquida é um parâmetro mais

importantes para a produtividade das culturas, pois está diretamente relacionada com a produção de fotoassimilados e de compostos carbonados que serão utilizados no metabolismo energético.

LOPEZ et al. (2019) concluíram que a A e a WUE exercem influência direta sobre o rendimento de grãos em soja. No estudo ao avaliarem de 383 linhagens recombinantes, foi constatada alta variabilidade genética e uma forte correlação genética entre produtividade e fotossíntese ($r = 0,80$). Além disso, a identificação de QTLs associados a A e WUE e a alta acurácia preditiva ($>0,65$) confirmaram o potencial da predição genômica como ferramenta eficiente para aprimorar o desempenho fisiológico e produtivo, reduzindo a necessidade de fenotipagem intensiva em campo. KELLER et al. (2024) constataram alta correlação genética positiva na taxa fotossintética líquida com o aumento de produtividade, demonstrando efeitos significativos na biomassa relacionados à variação genética na eficiência fotossintética de 178 linhagens *Phaseolus vulgaris*. Assim, o estudo fornece bases genéticas e fisiológicas sólidas para o desenvolvimento de cultivares mais eficientes no uso dos recursos e com maior produtividade potencial. A fotossíntese é um alvo promissor para o aprimoramento da produção agrícola (KELLER et al., 2022), visto que a eficiência de conversão da energia fotoquímica em biomassa continua apresentando alta variação genética, mesmo em linhagens de alto rendimento (DRIEVER et al., 2014).

Embora a seleção de produtividade de grãos seja de interesse para a cultura, ganhos com a seleção direta variam substancialmente entre caracteres e safras, sendo influenciados tanto pela herdabilidade quanto pela interação com o ambiente (LIU et al., 2012). Os resultados evidenciam que os caracteres g_s e C_i apresentaram melhor consistência entre ganho fisiológico e aumento da produtividade sob condições de diferentes ambientes, sendo, portanto, mais promissores na seleção indireta de genótipos produtivos, sobretudo em condições de estresses abióticos. No estudo realizado por LIU et al. (2012), os autores observaram que através do melhoramento genético, as cultivares modernas apresentaram maior taxa fotossintética ($0,59\% \text{ ano}^{-1}$), e um menor índice de área foliar ($0,31\% \text{ ano}^{-1}$). Adicionalmente, a taxa de transpiração e a condutância estomática apresentaram acréscimos de 57,7 e 22,3%, respectivamente. Resultado semelhante foi relatado por BI et al. (2024), onde os autores também observaram associação positiva entre a fotossíntese mais alta e o aumento dos componentes de rendimento em grãos de soja.

A Tabela 3 apresenta os impactos da seleção dos seis genótipos mais produtivos sobre as variáveis fisiológicas. Para a safra 1, a seleção resultou em ganhos positivos para A e WUE,

com incrementos de 5,12%, e de 12,28%, respectivamente. Esse resultado pode ser atribuído aos genótipos mais produtivos que apresentaram maior capacidade fotossintética em ambiente com melhor distribuição hídrica e balanço hídrico. Em ambientes com melhor distribuição hídrica, ocorre maior condutância estomática, permitindo maior entrada de CO₂ e, conseqüentemente, elevação da taxa fotossintética. Paralelamente, a maior WUE sugere que esses genótipos foram capazes de manter altas taxas de assimilação de carbono com menor consumo de água, o que caracteriza maior eficiência fisiológica no uso dos recursos hídricos (ALZHRANI, 2024).

No entanto, houve reduções nas demais variáveis na safra 1, destacando-se a queda de 12,28% para g_s e 10,95% para E (Tabela 3), o que pode indicar que a redução na g_s pode ser induzida pelo fechamento dos estômatos e, portanto, menor taxa de transpiração (E) (ZHANG et al. 2025). Na safra 2, observou-se um desempenho fisiológico inverso em algumas variáveis (Tabela 3). Houve ganhos expressivos em E (13,60%) e g_s (12,00%), sugerindo que os genótipos mais produtivos dentro da safra 2, apresentaram maior abertura estomática e maior fluxo de trocas gasosas, atribuindo a uma maior abertura estomática como tentativa de manter o metabolismo ativo, mesmo sob menor disponibilidade hídrica. Essa estratégia, embora mantenha a entrada de CO₂, pode ter elevado o custo em perda de água via estômatos, e baixa eficiência no uso da água para os processos metabólicos (GALMÉS et al., 2011).

Para A na safra 2, houve redução de 2,86%, e WUE sofreu queda acentuada de 16,07% (Tabela 3), indicando que em condições de menor distribuição hídrica, os genótipos produtivos podem priorizar outros mecanismos fisiológicos, como o aumento no ganho da g_s , E e C_i . Esse resultado corrobora com os dados da Tabela 2, onde g_s e C_i apresentaram melhor consistência entre ganho fisiológico e aumento da produtividade sob condições contrastantes. Além disso, a maior g_s promove o ganho de C_i , o que pode estar relacionado a maior disponibilidade de CO₂ para ser fixado pela Rubisco e, assim, maior produção de carboidratos para os grãos (GALMÉS et al., 2011; GUAN et al., 2015).

Tabela 3. Reflexos sobre as variáveis fisiológicas baseada na seleção dos seis genótipos mais produtivos.

Variável ¹	Safra	Média		Ganho
		Geral	Selecionados	(%)
<i>A</i>	1	24,21	25,45	5,12
	2	36,31	35,27	-2,86
<i>g_s</i>	1	0,57	0,50	-12,28
	2	0,50	0,56	12,00
<i>C_i</i>	1	301,49	295,74	-1,90
	2	212,08	221,90	4,63
<i>E</i>	1	6,12	5,45	-10,95
	2	7,94	9,02	13,60
WUE	1	3,93	4,57	12,28
	2	4,73	3,97	-16,07

¹: fotossíntese líquida (*A*, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração (*E*, $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (*g_s*, $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 (*C_i*, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) e eficiência no uso da água (WUE, $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$).

Na Figura 2, estão apresentadas a análise de componentes principais dos caracteres fisiológicos e de produtividade da soja associados as duas safras. As variáveis *C_i* e PROD correlacionam-se mais fortemente à safra 1. Esse fato pode estar atribuído a maior estabilidade hídrica e menor amplitude térmica (Figura 1A), resultando em maior eficiência na absorção e acúmulo de CO_2 e, portanto, sendo uma estratégia eficiente dos genótipos na relação entre metabolismo e acúmulo de fotoassimilados para os grãos de soja (ZLATEV, 2013). Na safra 2, foi possível observar maior dispersão dos dados avaliados. A proximidade entre os vetores das variáveis *A*, *E* e *g_s* sugere correlação positiva entre esses caracteres e desempenho fisiológico semelhante entre si. Além disso, *A*, *E* e *g_s* apresentaram correlação negativa com WUE dentro da safra, logo que este último é estimado pela razão entre fotossíntese líquida e transpiração.

A correlação negativa de WUE com as demais variáveis na safra 2, foi atribuída à maior abertura estomática culminando em maior transpiração e perda de água e, consequentemente, menor eficiência do uso da água. Apesar desses mecanismos contribuírem no aumento da fotossíntese, ocasionam também maior perda de água em forma de vapor (VERSLUES et al., 2006). Em períodos de seca, a planta prioriza controlar a eficiência no uso da água para prolongar sua sobrevivência e manter a produção de biomassa com o mínimo gasto hídrico possível (RONDA et al., 2001; BUCKLEY, 2005).

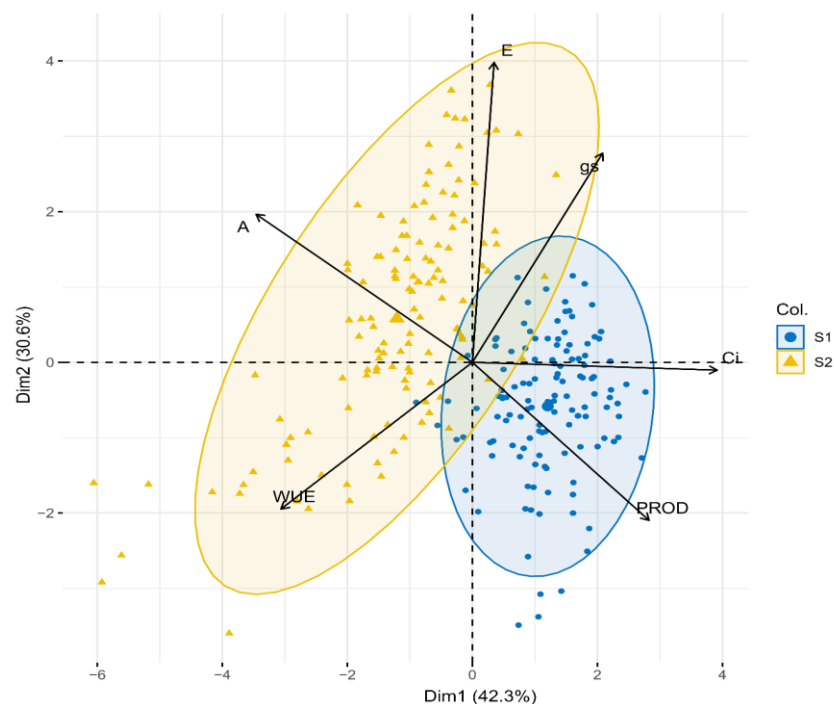


Figura 2. Análise de componentes principais para as variáveis fotossíntese líquida (*A*), condutância estomática (*g_s*), concentração interna de CO₂ (*C_i*), transpiração (*E*), eficiência no uso da água (*WUE*) e produtividade de grãos (*PROD*) avaliados em 32 genótipos de soja em duas safras.

Além disso, sob condições de estresse hídrico, os estômatos se fecham parcialmente, diminuindo a perda de vapor d'água, mas ainda permitindo alguma entrada de CO₂ para a fotossíntese (BELKO et al., 2012). Nessa condição ainda, pode ocorrer o aumento na relação *A/E* ou mecanismos de equilíbrio do metabolismo vegetal na relação entre fotossíntese e fotorrespiração. Contudo, a maioria dos estudos afirmam que na fisiologia da fotossíntese, as maiores taxas fotossintéticas geralmente ocorrem com aumento da condutância estomática e disponibilidade interna de CO₂ (LIBERATO et al., 2006; LAWLOR; TEZARA, 2009). A Figura 3 apresenta a rede de Correlação de Pearson, as linhas vermelhas representam a safra 1

e as azuis apresentam a safra 2. As correlações positivas mais expressivas foram observadas entre variáveis diretamente associadas à abertura estomática. A fotossíntese líquida (A) correlacionou-se positivamente com a g_s e WUE na safra 1, sugerindo que o incremento da atividade fotossintética esteve associado à maior condutância estomática e ao uso mais eficiente da água pela cultura, especialmente sob condições de maior disponibilidade hídrica.

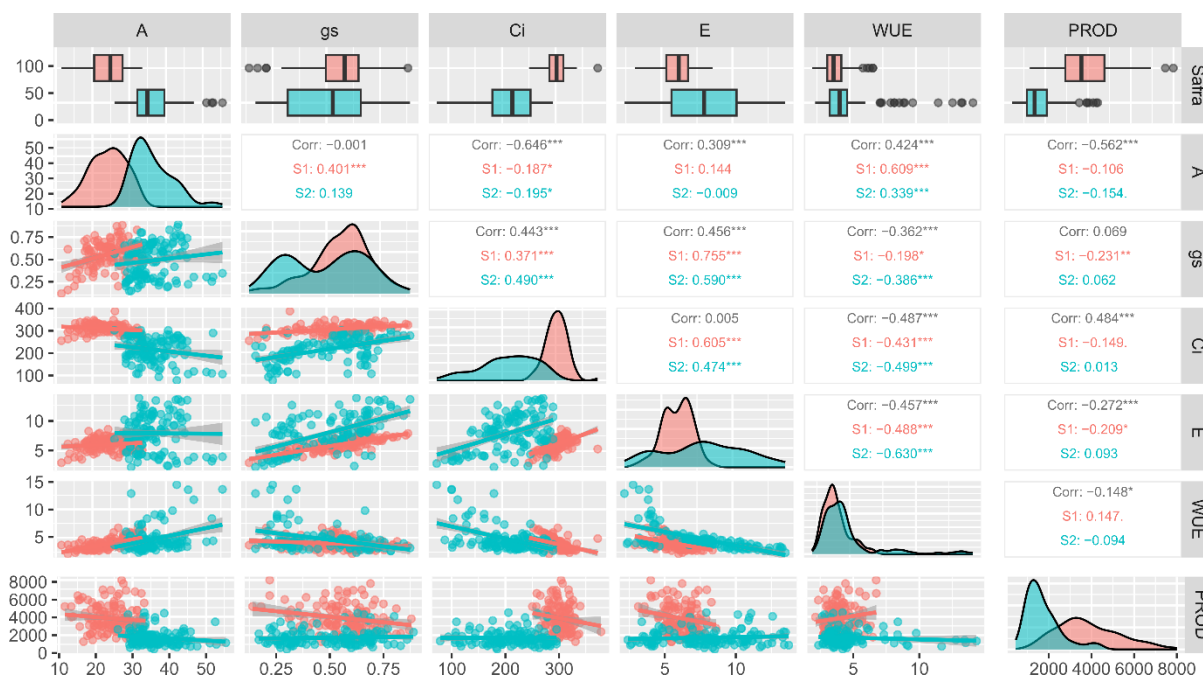


Figura 3. Correlação de Pearson entre as variáveis fotossíntese líquida (A), condutância estomática (g_s), concentração interna de CO_2 (C_i), transpiração (E), eficiência no uso da água (WUE) e produtividade de grãos (PROD) avaliados em 32 genótipos de soja em duas safras.

A relação entre g_s e E foi a mais forte do conjunto, com correlações elevadas em ambas as safras (S1: $r = 0,755^{***}$; S2: $r = 0,590^{***}$), evidenciando que o controle estomático é um fator comum a esses processos. Adicionalmente, houve correlações positivas e significativas entre a g_s e C_i em ambas as safras, com maior interação na safra 2 ($r = 0,490^{***}$), resultado que pode estar atribuído aos maiores níveis de condutância estomática que aumentam o influxo de CO_2 para o interior dos cloroplastos e, consequentemente, pode ocasionar maior eficiência do aparato fotossintético. Essa tendência também pode ser observada através da interação significativa entre as variáveis condutância estomática e fotossíntese líquida observadas na safra 1.

De forma complementar, na Figura 3 demonstra que a concentração interna de CO_2 (C_i) apresentou correlação positiva com PROD na safra 2, ainda que de baixa magnitude e não significativa. De acordo com a tabela 2, C_i apresentou o ganho de seleção positivo de

(+0,94%) na safra 1 e ganho expressivo de (+15,38%) na safra 2, ambos acompanhados por incremento em produtividade, indicando uma resposta favorável à seleção dessa variável. Portanto, a seleção para C_i demonstrou uma associação de ganho fisiológico e incremento de rendimento mesmo sob condições de déficit hídrico. Enquanto a fotossíntese líquida (A) não apresentou correlação positiva e significativa com PROD em nenhuma das safras. A produtividade de grãos (PROD) apresentou correlação positiva, embora baixa, com a eficiência no uso da água (WUE) na safra 1 ($r = 0,147^*$), indicando que não necessariamente genótipos mais eficientes no uso hídrico tendem a alcançar maiores rendimentos. Assim, apontando para a necessidade de cautela na seleção de WUE de forma isolada como critério de seleção em condições favoráveis ou desfavoráveis de disponibilidade hídrica.

As correlações negativas mais relevantes foram observadas principalmente em relações envolvendo a eficiência no uso da água (WUE). A condutância estomática (g_s) apresentou correlações negativas consistentes com WUE (S1: $r = -0,198^{***}$; S2: $r = -0,386^{***}$), sugerindo que maior abertura estomática, embora favoreça a entrada de CO_2 , implica em maior perda de água pela cultura, corroborando com os resultados da Figura 2. A concentração interna de CO_2 (C_i) apresentou correlação negativa significativa com WUE (S1: $r = -0,431^{***}$; S2: $r = -0,499^{***}$), reforçando que a elevação do CO_2 interno está associada a maior perda de água pela transpiração. Adicionalmente, a relação mais intensa foi observada entre E e WUE, com correlações fortemente negativas nas duas safras, evidenciando que maiores taxas de transpiração comprometem a eficiência no uso da água. Por fim, A apresentou correlação negativa moderada com C_i para as duas safras.

A variável WUE apresentou correlações negativas com g_s , C_i e E , resultando em maiores interações associadas a concentração de CO_2 e a transpiração, principalmente na safra 2. Segundo TAIZ e ZEIGER (2013), sob condições de estresse hídrico decorrente da deficiência de água no solo, pode ocorrer redução na eficiência do uso da água, acompanhada de maior fechamento estomático, o que limita o influxo de CO_2 e, conseqüentemente, diminui a taxa de assimilação de carbono. Paralelamente, essa resposta fisiológica reduz a perda de água por transpiração, mas também resulta em menor capacidade fotossintética. Esse resultado pode ser observado pela correlação significativa entre as variáveis analisadas em ambas as safras, contudo, com maior destaque para a segunda safra. Na safra 1, a condutância estomática (g_s) apresentou correlação negativa com a produtividade de grãos ($r = -0,231$), o que está em consonância com o resultado de ganho de seleção na Tabela 3, uma vez que a

escolha de genótipos com maior g_s não promoveu ganhos em PROD, reforçando que os materiais mais produtivos tenderam a apresentar menor perda de água.

De forma similar, a eficiência no uso da água (WUE) também se correlacionou negativamente com a produtividade na safra 2 ($r = -0,094$), o que explica os resultados da Tabela 2, em que os expressivos ganhos fisiológicos de WUE com (+50,87%), estiveram associados a reduções na produtividade de grãos. Este resultado pode estar atribuído a um expressivo *trade-off* entre eficiência do uso da água e rendimento sob condições déficit hídrico. Portanto, na safra conduzida sob menor disponibilidade hídrica, observou-se maior variabilidade entre os genótipos e a WUE, onde a seleção para WUE apresentou ganhos genéticos expressivos; entretanto, esses ganhos não se refletiram em incremento de produtividade e, assim, evidenciando que a seleção baseada exclusivamente em WUE pode não ser eficiente para identificar materiais mais produtivos.

5. CONCLUSÕES

Os resultados evidenciaram variabilidade genética significativa entre os genótipos de soja para os caracteres fisiológicos avaliados, indicando viabilidade para o uso da seleção indireta no melhoramento. As variáveis fisiológicas que proporcionam ganho em produtividade são fotossíntese líquida (A), a condutância estomática (g_s) e a concentração interna de CO_2 (C_i), apresentando maior herdabilidade e ganho positivo com a produtividade de grãos, sobretudo em condições de disponibilidade hídrica adequada, configurando-se como critérios promissores para seleção de genótipos superiores.

A eficiência da seleção indireta pode variar entre ambientes contrastantes quanto à disponibilidade hídrica, como ao selecionar WUE. Contudo, nas análises de correlação genética e fenotípica demonstraram que a condutância estomática (g_s) foi a variável mais estável e positivamente associada à produtividade de grãos, apresentando ganho genético principalmente sob déficit hídrico. Dessa forma, conclui-se que a condutância estomática (g_s) é a variável fotossintética mais promissora para uso em seleção indireta de genótipos de soja, por apresentar elevada herdabilidade, ganho genético consistente e correlação positiva com a produtividade em ambientes contrastantes.

6. REFERÊNCIAS

- AINSWORTH, E. A., YENDREK, C. R., SKONECZKA, J. A., LONG, S. P. Accelerating yield potential in soybean: potential targets for biotechnological improvement. **Plant, Cell & Environment**, v. 35, n. 1, p. 38-52, 2012.
- ALZHRANI, Y. Evaluation of drought and salinity tolerance potentials of different soybean genotypes based upon physiological, biochemical, and genetic indicators. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1466363, 2024.
- BASAL, O., MUNKHBAT, U., VERES, S. Enhancing drought tolerance in two soybean genotypes with varied susceptibilities through foliar application of acetic acid. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 43, n. 4, p. 1304-1315, 2024.
- BASNAYAKE, J., JACKSON, P. A., INMAN-BAMBER, N. G., & LAKSHMANAN, P. Sugarcane for water-limited environments. Variation in stomatal conductance and its genetic correlation with crop productivity. *Journal of experimental botany*, v. 66, n. 13, p. 3945-3958, 2015.
- BELKO, N.; ZAMAN-ALLAH, M.; CISSE, N.; DIOP, N.N.; ZOMBRE, G.; EHLERS, J. D.; VADEZ, V. Lower soil moisture threshold for transpiration decline under water deficit correlates with lower canopy conductance and higher transpiration efficiency in drought-tolerant cowpea. **Functional Plant Biology**, v. 39, n. 4, p. 306-322, 2012.
- BERTOLLI, S. C., RAPCHAN, G. L., & SOUZA, G. M. Photosynthetic limitations caused by different rates of water-deficit induction in *Glycine max* and *Vigna unguiculata*. **Photosynthetica**, v. 50, n. 3, p. 329-336, 2012.
- BI, Y., FAN, C., LIANG, W., LIAO, Y., HAN, D., LI, W., ... & LI, G. Combination effects of sulfur fertilizer and rhizobium inoculant on photosynthesis dynamics and yield components of soybean. **Agronomy**, v. 14, n. 4, p. 794, 2024.
- BLUM, Christian. Ant colony optimization: Introduction and recent trends. **Physics of Life reviews**, v. 2, n. 4, p. 353-373, 2005.
- BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. **Melhoramento de plantas**. Viçosa: UFV. 2017. 523 p.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V.; FRITSCHÉ-NETO, R. **Melhoramento de Plantas**. 8. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2021. 384 p.

BORÉM, Aluizio; MIRANDA, Glauco V.; FRITSCHÉ-NETO, Roberto. **Melhoramento de plantas**. Oficina de textos, 2021.

BUCKLEY TN (2005) The control of stomata by water balance. *New Phytol.* 168:275-292.

CADAVID, I. C., BALBINOTT, N., & MARGIS, R. Beyond transcription factors: more regulatory layers affecting soybean gene expression under abiotic stress. **Genetics and molecular biology**, v. 46, n. 1 Suppl 1, p. e20220166, 2023.

CAIXETA, K. S., PEREIRA, J. L., DA SILVA, F. L., JAKELAITIS, A., DA FONSECA, A. C. P., DOS SANTOS ALBERTI, A. L., ... & RIBEIRO, J. P. F. Adaptabilidade de cultivares de soja do programa de melhoramento da UFV à região leste de Goiás. **Brazilian Journal of Development**, v. 11, n. 1, p. e77016-e77016, 2025.

CASTRO-URREA, F. A., URRICARIET, M. P., STEFANOVA, K. T., LI, L., MOSS, W. M., GUZZOMI, A. L., ... & COWLING, W. A. Accuracy of selection in early generations of field pea breeding increases by exploiting the information contained in correlated traits. **Plants**, v. 12, n. 5, p. 1141, 2023.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 12, safra 2024/25 – n. 10 – Décimo Levantamento. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/10o-levantamento-safra-2024-25/e-book_boletim-de-safras-10o-levantamento-2025.pdf>. Acesso em: 09 de agosto de 2025.

COTRIM, M. F., GAVA, R., CAMPOS, C. N. S., DE DAVID, C. H. O., REIS, I. D. A., TEODORO, L. P. R., & TEODORO, P. E. Physiological performance of soybean genotypes grown under irrigated and rainfed conditions. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n. 1, p. 34-43, 2020.

CRUZ, C. D. Genes: a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 71-276, 2013.

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético** - ISBN 9788572694339. 4. ed. Viçosa: UFV, 2012. 514p.

CRUZ, C.D.; RODRIGUES, H.S.; ROSADO, R.D.S.; BHERING, L.L. **Biometria aplicada ao melhoramento genético**. In: SILVA, F.; BORÉM, A.; SEDIYAMA, T.; LUDKE, W. (ed) **Melhoramento da Soja**. Viçosa: UFV 2017, p. 249-287.

DA SILVA, C. E. M.; DE CARVALHO GONÇALVES, J. F.; FELDPAUSCH, T. R. Water-use efficiency of tree species following calcium and phosphorus application on an abandoned pasture, central Amazonia, Brazil. **Environmental and Experimental Botany**, v. 64, n. 2, p. 189-195, 2008.

DE 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. 1 – 12, 2016.

DE MIGUEL, M., SÁNCHEZ-GÓMEZ, D., CERVERA, M. T., & ARANDA, I. Functional and genetic characterization of gas exchange and intrinsic water use efficiency in a full-sib family of *Pinus pinaster* Ait. in response to drought. *Tree Physiology*, v. 32, n. 1, p. 94-103, 2012.

DRIEVER, S. M., LAWSON, T., ANDRALOJC, P. J., RAINES, C. A., & PARRY, M. A. J. Natural variation in photosynthetic capacity, growth, and yield in 64 field-grown wheat genotypes. **Journal of experimental botany**, v. 65, n. 17, p. 4959-4973, 2014.

DUVICK, D. N. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.). **Advances in agronomy**, v. 86, p. 83-145, 2005.

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja - região central do Brasil - 2009 e 2010**. Londrina: Embrapa Soja: Embrapa Cerrados: Embrapa Agropecuária Oeste, p. 262, 2008.

FAO - Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação. OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034. Disponível em: <https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/07/oecd-fao-agricultural-outlook-2025-2034_3eb15914/601276cd-en.pdf>. Acesso em: 09 de agosto de 2025.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. (Circular Técnica 48). Londrina: Embrapa Soja, p. 9, 2007.

FERRARI, E.; PAZ, A.; SILVA, A. C. Déficit hídrico e altas temperaturas no metabolismo da soja em semeaduras antecipadas. **Nativa**, v. 3, n. 1, p. 67-77, 2015.

GAI, Z., ZHANG, J., & LI, C. Effects of starter nitrogen fertilizer on soybean root activity, leaf photosynthesis and grain yield. **PloS one**, v. 12, n. 4, p. e0174841, 2017.

GALMES, J., RIBAS-CARBO, M., MEDRANO, H., & FLEXAS, J. Rubisco activity in Mediterranean species is regulated by the chloroplastic CO₂ concentration under water stress. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 2, p. 653-665, 2011.

GAO, Y., STEIN, M., OSHANA, L., ZHAO, W., MATSUBARA, S., & STICH, B. Exploring natural genetic variation in photosynthesis-related traits of barley in the field. *Journal of Experimental Botany*, v. 75, n. 16, p. 4904-4925, 2024.

GUAN, X. K., SONG, L., WANG, T. C., TURNER, N. C., LI, F. M. Effect of drought on the gas exchange, chlorophyll fluorescence and yield of six different-era spring wheat cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 201, n. 4, p. 253-266, 2015.

HOSSAIN, M. S., KHAN, M. A. R., MAHMUD, A., GHOSH, U. K., ANIK, T. R., MAYER, D., ... & MOSTOFA, M. G. Respostas diferenciais à seca de genótipos de soja em relação à fotossíntese e aos atributos de crescimento-productividade. **Plantas**, v. 13, n. 19, p. 2765, 2024.

HOSSAIN, M. S., KHAN, M. A. R., MAHMUD, A., GHOSH, U. K., ANIK, T. R., MAYER, D., & MOSTOFA, M. G. Differential drought responses of soybean genotypes in relation to photosynthesis and growth-yield attributes. **Plants**, v. 13, n. 19, p. 2765, 2024.

HUANG, C.; CAI, W.; LIANG, J. Determination of the components of soybean isoflavone in health products by ultra performance liquid chromatography. *Journal of Food Safety and Quality*, v. 8, n. 7, p. 2651-2656, 2017.

HÜHN, M. Estimation of broad sense heritability in plant populations: an improved method. **Theoretical and Applied Genetics**, v.46, p.87-99, 1975.

JIANG, Z.; LIU, Q.; DEKKERS, M. J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; ROBERTS, A. P. Control of Earth-like magnetic fields on the transformation of ferrihydrite to hematite and goethite. **Scientific Reports**, v. 6, n. 30395, p. 1-11, 2016.

JIN, J.; LIU, X.; WANG, G.; MI, L.; SHEN, Z.; CHEN, X.; HERBERT, S.J. Agronomic and physiological contributions to the yield improvement of soybean cultivars released from 1950 to 2006 in Northeast China. **Field Crops Research**, v.115, p.116-123, 2010.

JOHNSON, H.W.; BERNARD, R.L. Soybean, genetics and breeding. In: Norman, A.G. **The soybean genetics, breeding, physiology, nutrition and management**. New York: Academic Press, 1967. p. 1-73.

KELLER, B., SOTO, J., STEIER, A., PORTILLA-BENAVIDES, A. E., RAATZ, B., STUDER, B., ... & URBAN, M. O. Linking photosynthesis and yield reveals a strategy to improve light use efficiency in a climbing bean breeding population. *Journal of Experimental Botany*, v. 75, n. 3, p. 901-916, 2024.

KELLER, B., ZIMMERMANN, L., RASCHER, U., MATSUBARA, S., STEIER, A., & MULLER, O. Toward predicting photosynthetic efficiency and biomass gain in crop genotypes over a field season. **Plant Physiology**, v. 188, n. 1, p. 301-317, 2022.

LAPERA, C. A. I.; LIMA, M. W. P.; VILARINHO, M. S. Ecofisiologia da soja. In: DIAS, J. P. T. (org.). *Ecofisiologia de culturas agrícolas*. Belo Horizonte, MG: EdUEMG, 2018.

LAWAL, I. T., ALAKE, C. O., PORBENI, J. B., OLORUNMAIYE, P. M., OYETUNDE, O. A., & OGUNNIYAN, D. J. Studies on heritability and character relationship in soybean (*Glycine max* L. Merrill) genotypes grown in two contrasting environments. **Journal of Genetics Genomics and Plant Breeding**, v. 9, 2025.

LAWLOR, D. W.; TEZARA, W. Causas da diminuição da taxa fotossintética e da capacidade metabólica em células foliares deficientes em água: uma avaliação crítica dos mecanismos e integração de processos. **Anais de botânica**, v. 103, n. 4, p. 561-579, 2009.

LEE, G. A.; CRAWFORD, G. W.; LIU, L.; SASAKI, Y.; CHEN, X. Archaeological soybean (*Glycine max*) in East Asia: does size matter?. **PloS one**, v. 6, n. 11, p. e26720, 2011.

LI, S. Y., TENG, F., RAO, D. M., ZHANG, H. J., WANG, H. Y., YAO, X. D., ... & XIE, F. T. Photosynthesis of soybean cultivars released in different decades after grafting onto record-yield cultivars as rootstocks. **Photosynthetica**, v. 55, n. 4, p. 579-587, 2017.

LI, S.; TENG, F.; RAO, D.; YAO, X.; ZHANG, H.; WANG, H.; SONG, S.; MARTIN, S.K.; XIE, F. Agronomic traits of soybean cultivars released in different decades after grafting record-yield cultivar as rootstock. **Plant Breeding**, v. 136, p. 133-138, 2017.

LIBERATO, M. A. R., GONÇALVES, J. F. D. C., CHEVREUIL, L. R., NINA JUNIOR, A. D. R., FERNANDES, A. V., & SANTOS JUNIOR, U. M. D. Leaf water potential, gas exchange and chlorophyll a fluorescence in acariquara seedlings (*Minquartia guianensis* Aubl.) under water stress and recovery. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, p. 315-323, 2006.

LIU, G.; YANG, C.; XU, K.; ZHANG, Z.; LI, D.; WU, Z.; CHEN, Z. Development of yield and some photosynthetic characteristics during 82 years of genetic improvement of soybean genotypes in northeast China. **Australian Journal of Crop Science**, v.6, p.1416-1422, 2012.

LOPEZ, M. A., FREITAS MOREIRA, F., & RAINEY, K. M. Genetic relationships among physiological processes, phenology, and grain yield offer an insight into the development of new cultivars in soybean (*Glycine max* L. Merr). **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 651241, 2021.

LOPEZ, M. A., XAVIER, A., & RAINEY, K. M. Phenotypic variation and genetic architecture for photosynthesis and water use efficiency in soybean (*Glycine max* L. Merr). **Frontiers in plant science**, v. 10, p. 680, 2019.

MACHADO, B. Q. V.; NOGUEIRA, A. P. O.; HAMAWAKI, O. T.; REZENDE, G. F. JORGE, G. L.; SILVEIRA, I. C.; MEDEIROS L. A.; HAMAWAKI R. L.; HAMAWAKI C. D. L. Phenotypic and genotypic correlations between soybean agronomic traits and path analysis. **Genetics and molecular research**, [s.l.], v. 16, n. 2, 2017.

MATTOS, E. C.; ATUI, M. B.; SILVA, A. M.; FERREIRA, A. R.; NOGUEIRA, M. D.; SANTOS SOARES, J.; MARCIANO, M. A. M. Estudo da identidade histológica de subprodutos de soja (*Glycine max* L.). **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v. 74, n. 2, p. 104-110, 2016.

MCFARLANE, I.; O'CONNOR, E.A. World soybean trade: Growth and sustainability. **Modern Economy**, v.5, p.580-588, 2014.

MISSÃO, M. R. Soja: origem, classificação, utilização e uma visão abrangente do mercado. Maringá Management: **Revista de Ciências Empresariais**, v. 3, n. 1, p. 7-15, 2006.

MINUZZI, A.; BRACCINI, A. D. L.; RANGEL, M. A. S.; SCAPIM, C. A.; BARBOSA, M. C.; ALBRECHT, L. P. Qualidade de sementes de quatro cultivares de soja, colhidas em dois locais no Estado do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, n. 1, p. 176-185, 2010.

MOFOKENG, M. A. Genetic variability, heritability and genetic advance of soybean'(*Glycine max*)'genotypes based on yield and yield-related traits. **Australian Journal of Crop Science**, v. 15, n. 12, p. 1427-1434, 2021.

NATARAJAN, S., BASNAYAKE, J., WEI, X., & LAKSHMANAN, P. High-throughput phenotyping of indirect traits for early-stage selection in sugarcane breeding. **Remote Sensing**, v. 11, n. 24, p. 2952, 2019.

NOGUEIRA, A. P. O; SEDIYAMA, T.; GOMES, J.D. Avanços no melhoramento genético da cultura da soja nas últimas décadas. In: LEMES, E; CASTRO, L.; ASSIS, R. (Org.) **Doenças da soja: Melhoramento Genético e Técnicas de Manejo**. Campinas: Millennium Editora, 2015, p. 159-178.

ORT, D. R., ZHU, X.-G., SLATTERY, R. A., BERNACCHI, C. J., VANLOOCKE, A., BERNACCHI, C. J. Photosynthesis, light use efficiency, and yield of reduced-chlorophyll soybean mutants in field conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 549, 2017.

PANDA, D., MAHAKHUD, A., MOHANTY, B., MISHRA, S. S., & BARIK, J. Genotypic variation of photosynthetic gas exchange and stomatal traits in some traditional rice (*Oryza sativa* L.) landraces from Koraput, India for crop improvement. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 24, n. 5, p. 973-983, 2018.

PAULA, L. D. S., GUEDES, F. R. C. M., LOBATO, S. M. D. S., LIMA, M. D. R., PEREIRA, T. S., & LOBATO, A. K. D. S. Genetic parameters related to gas exchange and production components in cowpea populations under drought. **Vegetos**, v. 33, n. 2, p. 335-344, 2020.

PENG, S., KHUSH, G. S., VIRK, P., TANG, Q., & ZOU, Y. Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential. **Field Crops Research**, v. 108, n. 1, p. 32-38, 2008.

PEREIRA, G. G.; GARCIA, R. K.; FERREIRA, L. L.; BARRERA-ARELLANO, D. Soybean and soybean/beef-tallow biodiesel: a comparative study on oxidative degradation during long-term storage. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 94, n. 4, p. 587-593, 2017.

PETER, D. G.; VILAR, C. C.; USHIWATA, S. Y.; RODRIGUES, O. L. Modos de aplicação de fertilizante formulado NPK na cultura da soja em sistema de plantio direto. **Global Science and Technology**, v. 9, n. 1, p. 48-55, 2016.

PI, E., QU, L., HU, J., HUANG, Y., QIU, L., LU, H., ... & DU, L. Mechanisms of soybean roots' tolerances to salinity revealed by proteomic and phosphoproteomic comparisons between two cultivars. **Molecular & Cellular Proteomics**, v. 15, n. 1, p. 266-288, 2016.

PRADO, R. M. Mineral nutrition of tropical plants. Cham, Switzerland: Springer, 2021.

RAMYA, K. T., BELLUNDAGI, A., HARIKRISHNA, RAI, N., JAIN, N., SINGH, P. K., ... & PRABHU, K. V. Gene action governing the inheritance of stomatal conductance in four wheat crosses under high temperature stress condition. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 658443, 2021.

RAY, D.K.; MUELLER, N.D.; WEST, P.C.; FOLEY, J.A. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. **PLoS ONE**, v.8, 2013.

REBETZKE, G. J., CONDON, A. G., RICHARDS, R. A., & FARQUHAR, G. D. Gene action for leaf conductance in three wheat crosses. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 54, n. 4, p. 381-387, 2003.

ROCHA, R. S. Avaliação de variedades e linhagens de soja em condições de baixa latitude. p. 61, 2009. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal), Universidade Federal do Piauí, 2009.

- RODRIGUES, O.; DIDONET, A. D.; LHAMBY, J. C. B.; BERTAGNOLLI, P. F.; LUZ, J. S. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 3, p. 431-437, 2001.
- REYNOLDS, M., FOULKES, J., FURBANK, R., GRIFFITHS, S., KING, J., MURCHIE, E., & SLAFER, G. Achieving yield gains in wheat. **Plant, cell & environment**, v. 35, n. 10, p. 1799-1823, 2012.
- ROCHE, D. Stomatal conductance is essential for high yield potential of C3 crops. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 34, p 429 – 453, 2015.
- ROGERS, J.; CHEN, P.; SHI, A.; ZHANG, B.; SCABOO, A.; SMITH, F.; ZENG, A. Agronomic performance and genetic progress of selected historical soybean varieties in the southern USA. **Plant Breeding**, v.134, p.85-93, 2015.
- RONDA, R. J., DE BRUIN, H. A. R., & HOLTSLAG, A. A. M. Representation of the canopy conductance in modeling the surface energy budget for low vegetation. **Journal of Applied Meteorology**, v. 40, n. 8, p. 1431-1444, 2001.
- SEDIYAMA, T. **Tecnologias de produção e usos da soja**. 1. ed. Londrina, PR: Mecenass, v. 1, p. 314, 2009.
- SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, R de C.; REIS, M. S. **Melhoramento da Soja**. In: BORÉM, A. (Ed.). Melhoramento de espécies cultivadas. Viçosa: UFV, 2015. p. 553-604.
- SHAHINNIA, F., LE ROY, J., LABORDE, B., SZNAJDER, B., KALAMBETTU, P., MAHJOURIMAJD, S., & FLEURY, D. Genetic association of stomatal traits and yield in wheat grown in low rainfall environments. **BMC plant biology**, v. 16, n. 1, p. 150, 2016.
- SILVA, É. D. B. D., XAVIER, A., & FARIA, M. V. Impact of genomic prediction model, selection intensity, and breeding strategy on the long-term genetic gain and genetic erosion in soybean breeding. **Frontiers in Genetics**, v. 12, p. 637133, 2021.
- SILVA, S. F. D., MARTINS, M. D. O., DAS CHAGAS, P. V., SANTOS, G. L. D., COÊLHO, E. D. S., BARROS JÚNIOR, A. P., ... & RIBEIRO, J. E. D. S. Gas exchanges and chlorophyll fluorescence of soybean genotypes subjected to flooding stress. *Revista Caatinga*, v. 37, p. e12468, 2024.

SOUZA, N. C. D. S. D. A difusão e assimilação de CO₂ em folhas C4 (*Saccharum* spp. e *Sorghum bicolor*) e suas relações com o nitrogênio foliar e o déficit hídrico. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 9, p. 1351-1359, 2006.

SUO, R., WANG, M., & ZHAO, T. Contribution of Photosynthetic, Root and Phenotypic Traits to Soybean Plant Height. **Sustainability**, v. 16, n. 7, p. 2886, 2024.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. Tradução: SANTARÉM, E.R. [et al.] 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918p.

Team, R.C. R: A Language and Environment for Statistical Computing. 2013.

TEODORO, L. P. R. et al. Understanding the combining ability for physiological traits in soybean. *PloS ONE*, v. 14, n. 5, e0226523, 2019.

USDA - World Agricultural Supply and Demand Estimates. WASDE-662 – July 11, 2025. Disponível em: <<https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/wasde0725.pdf>>. Acesso em: 09 de agosto de 2025.

VERSLUES, P. E., AGARWAL, M., KATIYAR-AGARWAL, S., ZHU, J., & ZHU, J. K. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. **The Plant Journal**, v. 45, n. 4, p. 523-539, 2006.

WILSON, E.W.; ROWNTREE, S.C.; SUHRE, J.J.; WEIDENBENNER, N.H.; CONLEY, S.P.; DAVIS, V.M.; DIERS, B.W.; ESKER, P.D.; NAEVE, S.L.; SPECHT, J.E.; CASTEEL, S.N. Genetic gain x management interactions in soybean: II. Nitrogen Utilization. **Crop Science**, v.54, p.340-348, 2014.

WU, A., HAMMER, G. L., DOHERTY, A., VON CAEMMERER, S., & FARQUHAR, G. D. Quantifying impacts of enhancing photosynthesis on crop yield. **Nature plants**, v. 5, n. 4, p. 380-388, 2019.

XAVIER, A., JARQUIN, D., HOWARD, R., RAMASUBRAMANIAN, V., SPECHT, J. E., GRAEF, G. L., & RAINEY, K. M. Genome-wide analysis of grain yield stability and

environmental interactions in a multiparental soybean population. **G3: Genes, Genomes, Genetics**, v. 8, n. 2, p. 519-529, 2018.

XIAO, Y. G., QIAN, Z. G., WU, K., LIU, J. J., XIA, X. C., JI, W. Q., & HE, Z. H. Genetic gains in grain yield and physiological traits of winter wheat in Shandong Province, China, from 1969 to 2006. **Crop Science**, v. 52, n. 1, p. 44-56, 2012.

XU, D.; ZHANG, J.; CAO, Y.; WANG, J.; XIAO, J. Influence of microcrystalline cellulose on the microrheological property and freeze-thaw stability of soybean protein hydrolysate stabilized curcumin emulsion. **LWT-Food Science and Technology**, v. 66, p. 590-597, 2016.

ZEBA, N., RASAL-MONIR, M., MODAK, S., SARKER, A., & RAHAMAN, M. A. Genetic Variability, Correlation Co-efficient and Path Analysis in Soybean (*Glycine max* L. Merr.) Genotypes. **Asian Journal of Advances in Agricultural Research**, v. 19, n. 2, p. 46-55, 2022.

ZHANG, G., LI, Z., ZHU, Q., YANG, C., SHU, H., GAO, Z., ... & LIU, R. Cropping patterns and plant population density alter nitrogen partitioning among photosynthetic components, leaf photosynthetic capacity and photosynthetic nitrogen use efficiency in field-grown soybean. **Industrial Crops and Products**, v. 226, p. 120680, 2025.

ZHANG, M.; LIU, S.; WANG, Z.; YUAN, Y.; ZHANG, Z.; LIANG, Q.; YANG, X.; DUAN, Z.; LIU, Y. KONG, F.; LIU, B.; TIAN, Z. Progress in soybean functional genomics over the past decade. **Plant Biotechnology Journal**, v. 20, n. 2, p. 256-282, 2022.

ZLATEV, Z. S. Alterações induzidas pela seca e recuperação da fotossíntese em duas cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Emirates de Alimentos e Agricultura**, v. 25, n. 12, p. 1014, 2013.