Câmpus Sul
UnU - Ipameri

Universidade Estadual de Goiás

ESTADO DE GOIÁS

PPGPV

**Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal**

# A MEMÓRIA AO ESTRESSE PRESERVA A PRODUTIVIDADE DA SOJA?

**MARIANA SOUZA GRATÃO**

**MESTRADO**

**Ipameri-GO**
**2026**

**MARIANA SOUZA GRATÃO**

# A MEMÓRIA AO ESTRESSE PRESERVA A PRODUTIVIDADE DA SOJA?

Orientador: Prof. Dr. Fábio Santos Matos

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Goiás – UEG, Campus Sul, Unidade Universitária de Ipameri como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal para obtenção do título de MESTRE em Produção Vegetal.

Ipameri-GO
2026

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UEG
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S771m SOUZA GRATÃO, MARIANA
A MEMÓRIA AO ESTRESSE PRESERVA A PRODUTIVIDADE DA SOJA? / MARIANA SOUZA GRATÃO; orientador FABIO SANTOS MATOS. -- IPAMERI, 2026.
31 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação Mestrado Acadêmico em Produção Vegetal) -- Unidade de Ipameri, Universidade Estadual de Goiás, 2026.

1. ESTRESSE HÍDRICO. 2. FISIOLOGIA VEGETAL. 3. MECANISMOS DE ADAPTAÇÃO. 4. PRODUTIVIDADE DA SOJA. I. SANTOS MATOS, FABIO, orient. II. Título.

Câmpus Sul
UnU - Ipameri

Universidade Estadual de Goiás

ESTADO DE GOIÁS

# CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO:** "A memória ao estresse preserva a produtividade de soja."

**AUTOR(A):** Mariana Souza Gratão
**ORIENTADOR(A):** Fábio Santos Matos

Aprovado(a) como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE(A) EM PRODUÇÃO VEGETAL, pela comissão Examinadora:

Prof. Dr. Fábio Santos Matos (Orientador)

gov.br Documento assinado digitalmente
FABIO SANTOS MATOS
Data: 25/05/2026 14:11:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Universidade Estadual de Goiás/ Unidade Universitária Ipameri- GO

Prof. Dr. Marcelo Rocha dos Santos

gov.br Documento assinado digitalmente
MARCELO ROCHA DOS SANTOS
Data: 27/05/2026 09:13:17-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Instituto Federal Baiano/ Câmpus Guanambi- BA

Prof.ª Dr.ª Samantha Salomão Caramori

gov.br Documento assinado digitalmente
SAMANTHA SALOMAO CARAMORI
Data: 27/05/2026 10:22:37-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Universidade Estadual de Goiás/ Câmpus Anápolis- GO

Data da realização: 10 de abril de 2026

Registro de Declaração

Número: 326 Livro: R-01 Folhas: 05A Data: 10/04/2026 Assinatura:

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família e ao meu namorado, pelo amor, apoio e por sempre acreditarem em mim ao longo desta caminhada.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, pela força e por me permitir chegar até aqui, guiando meus passos e me dando sabedoria e perseverança ao longo de toda essa caminhada.

À Universidade Estadual de Goiás, especialmente à Unidade Universitária de Ipameri, pela oportunidade de realização do mestrado e por proporcionar um ambiente de aprendizado, crescimento acadêmico e desenvolvimento científico. Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, pela formação oferecida, pelo suporte institucional e por contribuir significativamente para minha trajetória profissional e científica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fábio Santos Matos, pela orientação, confiança, ensinamentos e dedicação ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do grupo de pesquisa Fisiologia da Produção Vegetal, pelo apoio, colaboração e troca de conhecimentos durante a condução dos experimentos e desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos, que estiveram presentes durante essa jornada, tornando esse caminho mais leve. Em especial, agradeço a Amanda Ayda e Arielle Abdala, pela amizade, companheirismo e apoio ao longo dessa caminhada.

Por fim, expresso minha mais profunda gratidão às pessoas mais importantes da minha vida e que sempre acreditaram em mim: minha mãe Denise de Souza, minha avó Maria do Carmo, meu avô Antonio de Souza, meu tio Darlei de Souza e meu namorado Rodrigo Cavalcante. Eles sempre confiaram no meu potencial, me incentivaram a seguir em frente e, mesmo nos momentos mais difíceis, nunca deixaram faltar apoio, cuidado e palavras de encorajamento. Se hoje concluo esta etapa tão importante da minha vida, é porque tive ao meu lado pessoas que nunca me deixaram desistir. A eles devo grande parte desta conquista.

A todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos

**SUMÁRIO**

RESUMO ..... VI

ABSTRACT ..... VII

1. INTRODUÇÃO ..... 1

2. OBJETIVOS ..... 4

2.1 OBJETIVO GERAL ..... 4

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS ..... 4

3. MATERIAL E MÉTODOS ..... 5

3.1 TEOR RELATIVO DE ÁGUA (TRA) E DÉFICIT DE SATURAÇÃO FOLIAR (DSF) ..... 7

3.2 PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS E VARIÁVEIS BIOQUÍMICAS ..... 8

3.3 VARIÁVEIS DE CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE ..... 8

3.4 PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS ..... 9

4. RESULTADOS ..... 10

5. DISCUSSÃO ..... 16

5. CONCLUSÃO ..... 19

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 20

## RESUMO

A intensificação dos eventos de déficit hídrico tem comprometido significativamente a produtividade da soja, especialmente em regiões sujeitas à variabilidade climática. Nesse contexto, objetivou-se identificar a importância da memória fisiológica ao stress no crescimento e na produção de grãos de soja. O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Universidade Estadual de Goiás, utilizando delineamento inteiramente casualizado com tratamentos compostos por diferentes regimes de déficit hídrico contínuo e descontínuo, aplicados em um ou dois ciclos, além de tratamento controle irrigado. O déficit hídrico promoveu redução no teor relativo de água e alterações no crescimento vegetativo das plantas. Entretanto, os tratamentos severo e moderado apresentaram respostas distintas, mesmo sob reduções semelhantes do estado hídrico. O tratamento severo manteve maior área foliar e desempenho produtivo comparável ou superior em algumas variáveis, como o peso de 100 grãos. Em relação às respostas bioquímicas, observaram-se incrementos nos teores de clorofila total e carotenoides, além de alterações na atividade das enzimas antioxidantes CAT, SOD e POD. A manutenção relativa da atividade da CAT no tratamento severo sugere participação de mecanismos antioxidantes associados à tolerância ao estresse hídrico. A análise multivariada evidenciou integração entre respostas morfofisiológicas, bioquímicas e produtivas. Os resultados obtidos sugerem a ocorrência de mecanismos fisiológicos compatíveis com processos de aclimatação e possível memória fisiológica em plantas submetidas a déficits hídricos sucessivos, reforçando o potencial adaptativo da cultura frente à variabilidade hídrica.



**Palavras-chave:** estresse hídrico; fisiologia vegetal; mecanismos de adaptação vegetal.

## ABSTRACT

The intensification of drought events has significantly compromised soybean productivity, especially in regions subjected to climatic variability. In this context, the objective was to identify the importance of physiological memory to stress in the growth and grain production of soybeans. The experiment was conducted in a greenhouse at the State University of Goiás, using a completely randomized design composed of treatments with different continuous and discontinuous water deficit regimes, applied in one or two cycles, in addition to a fully irrigated control treatment. Water deficit reduced relative water content and promoted changes in vegetative growth. However, severe and moderate deficit treatments showed distinct responses, even under similar reductions in plant water status. The severe deficit treatment maintained greater leaf area and productive performance comparable or superior in some variables, such as 100-grain weight. Regarding biochemical responses, increases in total chlorophyll and carotenoid contents were observed, in addition to changes in the activity of antioxidant enzymes CAT, SOD, and POD. The relative maintenance of CAT activity under severe deficit suggests the participation of antioxidant mechanisms associated with drought tolerance. Multivariate analysis evidenced integration among morphophysiological, biochemical, and productive responses. The obtained results suggest the occurrence of physiological mechanisms compatible with acclimation processes and possible physiological memory in plants subjected to successive water deficits, reinforcing the adaptive potential of soybean under conditions of water variability..



**Keywords:** water stress; plant physiology; plant adaptation mechanisms.

# 1. INTRODUÇÃO

A agricultura exerce papel estratégico no desenvolvimento socioeconômico global, especialmente na segurança alimentar e na sustentação das cadeias agroindustriais. Nesse contexto, a soja (*Glycine max* L. Merrill) destaca-se entre as principais culturas agrícolas do mundo devido à sua ampla adaptabilidade, elevado valor econômico e múltiplas aplicações industriais. A expansão tecnológica associada à cultura consolidou o Brasil como um dos principais produtores e exportadores mundiais da oleaginosa, evidenciando sua relevância para a produção de alimentos, biocombustíveis e geração de renda no setor agrícola (FAO, 2025).

Atualmente, o Brasil lidera a produção e exportação mundial de soja, sendo responsável por aproximadamente 40% da oferta global do grão (USDA, 2025). Na safra 2024/2025, a produção nacional atingiu cerca de 171,5 milhões de toneladas, refletindo a elevada competitividade do agronegócio brasileiro (CONAB, 2025). Nesse contexto, a região Centro-Oeste destaca-se como principal polo produtivo da cultura, com o estado de Goiás consolidando-se como o segundo maior produtor nacional de soja, evidenciando a expressiva participação da oleaginosa no agronegócio brasileiro e na dinâmica produtiva regional (UMBURANAS et al., 2025).

A soja constitui uma das principais *commodities* agrícolas do mundo, sendo fonte essencial de proteína vegetal para a alimentação humana, nutrição animal e produção de biocombustíveis (BATISTA; DUKU; HEIN, 2023). No Brasil, o complexo soja-biodiesel exerce papel relevante na economia agrícola, contribuindo significativamente para o Produto Interno Bruto (PIB) agrícola e para a geração de empregos no agronegócio nacional (CEPEA; ABIOVE, 2025). Entretanto, apesar da elevada importância produtiva e econômica da cultura, a sustentabilidade da cadeia da soja permanece fortemente condicionada aos fatores climáticos, especialmente à disponibilidade hídrica ao longo do ciclo fenológico da cultura (CARVALHO et al., 2025).

Embora frequentemente cultivada em sistemas de sequeiro, a soja é altamente dependente da disponibilidade hídrica, apresentando elevada sensibilidade à distribuição espaço-temporal das chuvas, especialmente durante os estádios de germinação, florescimento e enchimento de grãos (PENG et al., 2025). Entre os principais fenômenos climáticos que influenciam a produção de soja no Brasil, destacam-se El Niño e La Niña, responsáveis por alterações no regime pluviométrico e pelo aumento da ocorrência de secas severas e veranicos intraestacionais (MENDES et al., 2023; OLIVEIRA et al., 2024).

Na última década, os episódios de restrição hídrica impactaram significativamente a produção nacional de soja, resultando em atrasos no plantio, falhas no estabelecimento inicial

da cultura, redução do rendimento de grãos e expressivos prejuízos econômicos, estimados em mais de R$ 58,1 bilhões (NOIA JÚNIOR et al., 2025). Na região Centro-Oeste, especialmente entre 2018 e 2024, foram registrados veranicos recorrentes, responsáveis por perdas produtivas superiores a 20% (ANA, 2024; BRASIL, 2022; CAETANO et al., 2023). No bioma Cerrado, a sazonalidade climática caracteriza-se por estações bem definidas, com período chuvoso entre outubro e abril e estação seca entre maio e setembro (SOUZA et al., 2025). Embora o cultivo da soja ocorra durante a estação chuvosa, a ocorrência de veranicos intraestacionais reduz a disponibilidade hídrica do solo em fases fenológicas críticas, comprometendo o desempenho fisiológico e produtivo da cultura (FERREIRA et al., 2024).

A escassez de precipitação compromete diretamente a época adequada de semeadura e, consequentemente, o potencial germinativo, o estabelecimento de estandes uniformes e o desenvolvimento vegetativo das plantas, reduzindo a eficiência do uso da água e aumentando a vulnerabilidade da cultura às oscilações climáticas (ALVES et al., 2024; FIORINI et al., 2024). Como consequência, observa-se elevada variabilidade interanual da produtividade, com impactos diretos sobre a estabilidade produtiva e a segurança do abastecimento global de grãos (ARIF et al., 2025). Nesse contexto, a ocorrência de déficits hídricos transitórios, associados a veranicos mesmo durante a estação chuvosa, reforça a necessidade de compreender mecanismos de aclimatação e memória fisiológica, capazes de aumentar a tolerância da soja a eventos sucessivos de estresse hídrico ao longo do ciclo fenológico.

A memória fisiológica constitui importante estratégia adaptativa da soja ao déficit hídrico, na qual exposições prévias ao estresse modulam respostas fisiológicas, bioquímicas e morfológicas, aumentando a tolerância a eventos subsequentes de seca (KAMBONA et al., 2023; JHA et al., 2024). Essa capacidade está associada à elevada plasticidade fenotípica da cultura, envolvendo ajustes osmóticos, regulação estomática, reorganização metabólica e modulação do sistema antioxidante sob condições de estresse abiótico (CHAND et al., 2022; DESA et al., 2023; KONG; HENRY; SMITH, 2025). Tais mecanismos contribuem para a manutenção do equilíbrio redox celular, preservação do aparato fotossintético e continuidade do desempenho fisiológico mesmo sob restrição hídrica.

Portanto, investigar os mecanismos de memória fisiológica da soja sob condições de déficit hídrico torna-se essencial para ampliar a compreensão das respostas adaptativas da cultura frente às oscilações hídricas, especialmente no Cerrado e demais regiões produtoras. A maior elucidação dos mecanismos fisiológicos, bioquímicos e antioxidantes envolvidos na resposta ao estresse hídrico pode fornecer subsídios para o desenvolvimento de cultivares mais resilientes, bem como para a implementação de estratégias agronômicas mais eficientes, capazes de minimizar os impactos de veranicos e déficits hídricos severos sobre o desempenho

produtivo da cultura no Centro-Oeste brasileiro (FREITAS; SILVA, 2024; MONACO et al., 2024; FALCIONI et al., 2025).

# 2. OBJETIVOS

## 2.1 Objetivo geral

O presente estudo teve como objetivo identificar a importância da memória fisiológica ao stress no crescimento e na produção de grãos de soja.

## 2.2 Objetivos específicos

- Identificar a existência da retenção de informações de estresse hídrico.
- Analisar os efeitos da memória da planta de soja na produtividade de grãos.
- Identificar os caminhos fisiológicos utilizados para reter informações de estresse hídrico.

## 3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na fazenda experimental da Universidade Estadual de Goiás (UEG), Campus Sul, Unidade Universitária de Ipameri, GO (17° 42' 59,12 S; 48°08' 40,49" W, 773 m de altitude). O cultivo foi realizado em estufa coberta com plástico filme transparente e laterais revestidas com tela Sombrite® de 50% de sombreamento. O clima da região é classificado como Aw, tropical com inverno seco e verão chuvoso, segundo Köppen, com temperatura média anual de 20 °C (ALVARES et al., 2014).

Amostras de solo da camada de 0–20 cm foram coletadas em diferentes pontos da área experimental e homogeneizadas para composição de uma amostra representativa. As características químicas e físicas do solo estão apresentadas na Tabela 1. O substrato utilizado foi composto por solo e areia na proporção 3:1, utilizando-se 12 kg da mistura para preenchimento dos recipientes (7,07 dm² de área, 30 cm de profundidade e 13,6 dm³ de volume). Após análise química, o substrato foi corrigido conforme as recomendações técnicas para a cultura da soja (PROCHNOW et al., 2010).

**Tabela 1.** Características químicas e físicas do solo.

| **S** | **P Mehlich** | **K** | **Ca** | **Mg** | **Al** | **H+Al** | **M.O.** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | mg $dm^{-3}$ | | | $cmol_c dm^{-3}$ | | | g $dm^3$ |
| 7.10 | 65.60 | 126.10 | 5.10 | 2.60 | 0.00 | 2.70 | 35.00 |
| **Na** | **Zn** | **Cu** | **Fe** | **Mn** | **Argila** | **Areia** | **Silte** |
| | | mg $dm^3$ | | | Textura (g $kg^{-1}$) | | |
| 1.60 | 8.30 | 0.60 | 52.70 | 22.00 | 320.00 | 590.00 | 90.00 |
| **CTC** | **V** | **Ca/CTC** | **Mg/CTC** | **K/CTC** | **H+Al/CTC** | **Carbono** | **pH** |
| | | | % | | | g $dm^3$ | $CaCl_2$ |
| 10.73 | 74.81 | 47.53 | 24.23 | 2.98 | 25.16 | 20.30 | 5.80 |

Extratores: P e K Mehlich$^{-1}$; $Ca^{2+}$ - KCl 1 mol/L; H+Al – Acetato de cálcio 0,5 mol/L em pH 7.

Foram semeadas duas sementes de soja cv. NEO 690, de crescimento determinado e ciclo médio-precoce, por recipiente contendo o substrato previamente preparado. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema de parcelas subdivididas 2 × 2 + 1 tratamento adicional, com seis repetições. Nas parcelas, foram avaliados dois regimes de déficit hídrico (contínuo e descontínuo), enquanto as subparcelas corresponderam à aplicação de um ou dois ciclos de déficit hídrico. Adicionalmente, foi incluído um tratamento controle, composto por plantas mantidas sob irrigação diária.

O experimento foi composto por plantas submetidas a um ou dois ciclos de déficit hídrico, além de um tratamento adicional (controle) mantido sob irrigação diária. Os ciclos de

restrição hídrica foram aplicados em dois regimes: contínuo e descontínuo. O primeiro ciclo de déficit hídrico foi realizado no estádio fenológico V5, caracterizado pela presença de cinco nós e da quarta folha trifoliolada completamente desenvolvida. Nesse período, a irrigação foi suspensa, submetendo as plantas ao regime contínuo, com quatro dias consecutivos sem irrigação, ou ao regime descontínuo, composto por dois dias sem irrigação, reidratação no terceiro dia e mais dois dias de restrição hídrica.

O segundo ciclo de déficit hídrico foi aplicado no estádio fenológico R3, caracterizado pelo início da formação das vagens, com aproximadamente 5 mm de comprimento nos quatro últimos nós da haste principal, seguindo os mesmos regimes hídricos adotados no primeiro ciclo. Nesse esquema experimental, 12 plantas foram submetidas a um único ciclo de déficit hídrico, enquanto outras 12 plantas passaram por dois ciclos sucessivos de restrição hídrica. Adicionalmente, seis plantas foram mantidas sob irrigação diária, constituindo o tratamento controle sem estresse hídrico.

Após os períodos de restrição hídrica, as plantas foram irrigadas normalmente, com reposição correspondente a 100% da evapotranspiração da cultura, até o final do ciclo fenológico. O croqui do delineamento experimental está apresentado na Figura 1.

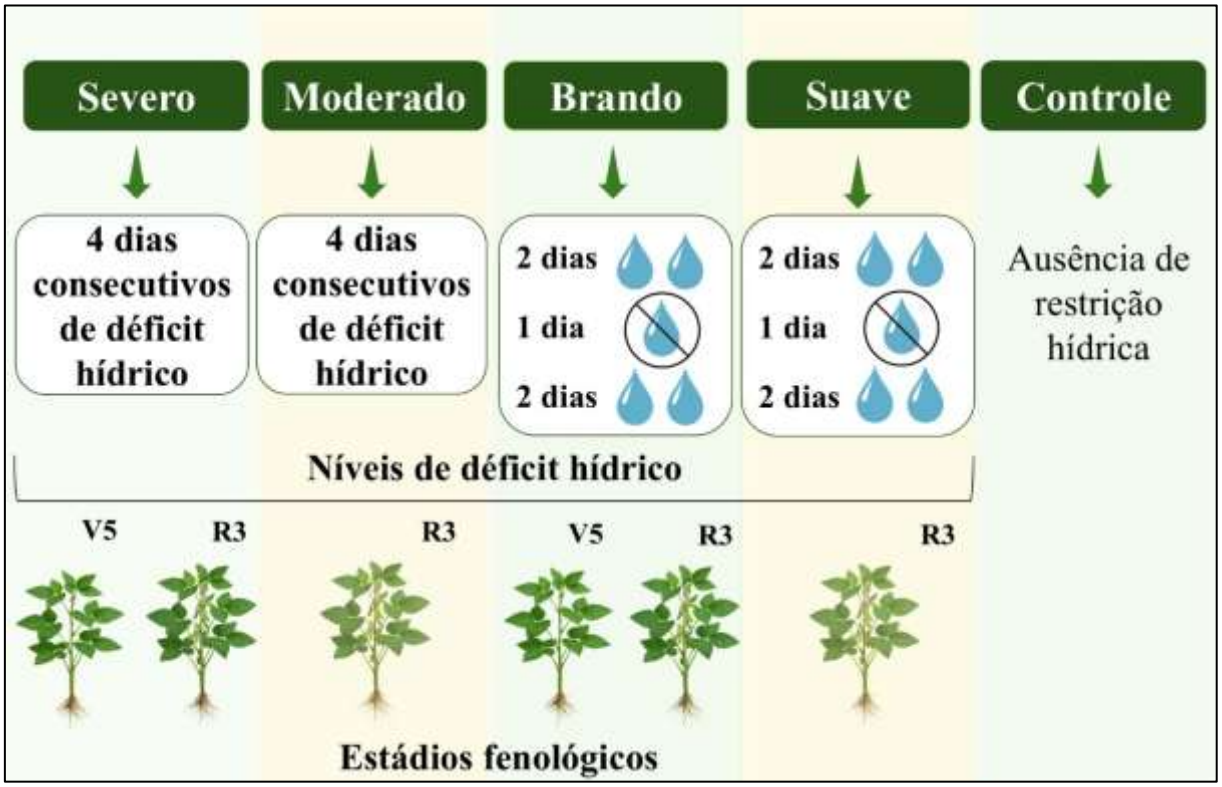



**Figura 1.** Delineamento experimental referente aos distintos níveis de déficit hídrico adotados.

O volume de água foi aplicado com base na evapotranspiração diária da cultura da soja, realizando o cálculo de irrigação com base no histórico climático do mês anterior. Como o

coeficiente para a cultura (*kc*) da soja não foi determinado para a região de Ipameri-GO, utilizou-se o kc igual a 1,00, conforme estimativa da FAO 56 (ALLEN et al., 1998), em um conjunto de culturas em estádio de desenvolvimento inicial. O volume de água utilizado foi calculado pela determinação da evapotranspiração de referência e o coeficiente da cultura segundo a equação:

$$ETc = ETo \; x \; kc,$$

Onde:

*ETc* = evapotranspiração da cultura

*kc* = coeficiente da cultura

*ETo* = Evapotranspiração de referência

O cálculo da *ETo* diária foi realizado por intermédio do método de Penman-Monteith recomendado pela FAO (SMITH et al., 1991), com os dados diários de temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, insolação e velocidade do vento, coletados na Estação Meteorológica do INMET localizado no município de Ipameri, Goiás, Brasil.

### 3.1 Teor Relativo de Água (TRA) e Déficit de Saturação Foliar (DSF)

O teor relativo de água (TRA) e o déficit de saturação foliar (DSF) foram avaliados no último dia do segundo ciclo de déficit hídrico, correspondente ao estádio $R_3$ da soja. O TRA indica a fração de água presente nos tecidos foliares em relação à capacidade máxima de retenção hídrica, refletindo o grau de hidratação da planta frente ao estresse hídrico.

Para tanto, foram coletados cinco discos foliares por planta com diâmetro de 1 cm, imediatamente pesados para obtenção da massa fresca (MF). Em seguida, as amostras foram hidratadas em placas de Petri contendo água destilada por quatro horas, permitindo que os tecidos alcançassem a massa túrgida (MT) e novamente pesados. Após a hidratação, os discos foram destinados ao processo de secagem em estufa a 70 °C por 72 horas, obtendo-se a massa seca (MS). O TRA foi calculado utilizando a seguinte equação 1:

$$TRA\% = \frac{MF - MS}{MT - MS} \times 100 \quad (1)$$

O índice DSF quantifica o déficit de água em relação à condição de saturação total da folha, sendo diretamente proporcional ao estresse hídrico enfrentado pela planta, sendo determinado pela equação 2:

$$DSF\% = \frac{MT - MF}{MT - MS} \times 100 \quad (2)$$

### 3.2 Pigmentos fotossintéticos e variáveis bioquímicas

As variáveis bioquímicas, os pigmentos fotossintéticos e o índice SPAD, foram avaliadas no último dia do segundo ciclo de déficit hídrico em todas as plantas (estádio fenológico $R_3$). Para a determinação das clorofilas a, b e carotenoides, folhas recém-coletadas foram incubadas em dimetilsulfóxido (DMSO) para extração dos pigmentos, conforme descrito por Wellburn (1994). Após a extração, as absorbâncias do extrato foram medidas em espectrofotômetro a 470 nm, 645 nm e 662 nm. Os teores de clorofilas e carotenoides foram calculados utilizando as equações específicas de Wellburn (1994), adequadas para extratos em DMSO. Para a quantificação das enzimas antioxidantes, aproximadamente um grama de material vegetal foi homogeneizado segundo recomendações de Zhu et al. (2004). O sobrenadante foi utilizado para determinar a atividade enzimática e o teor de proteína.

A leitura SPAD foi realizada utilizando um clorofilômetro portátil, instrumento que estima indiretamente o teor de clorofila nas folhas por meio da transmissão de luz. Essa medição foi feita em folhas completamente expandidas, evitando a nervura central, cujos valores foram expressos em unidades SPAD.

A atividade da catalase (CAT) foi determinada conforme Aebi e Lester (1984) na absorvância de 240 nm em um meio de reação contendo fosfato de potássio (15 mM, pH 7,0, $H_2O_2$). A atividade de guaiacol peroxidase (POD) foi determinada de acordo com Zeraik et al. (2008) utilizando guaiacol como substrato. A atividade enzimática foi medida por oxidação de guaiacol em tetraguaiacol pelo aumento na absorvância a 470 nm. A atividade da superóxido dismutase (SOD) foi medida conforme o método espectrofotométrico descrito por Giannopolitis e Ries (1977). A atividade enzimática foi estimada conforme, Beauchamp e Fridovich (1971) e expressa por proteína. O conteúdo de proteínas solúveis totais foi determinado conforme Bradford (1976).

### 3.3 Variáveis de crescimento e produtividade

As variáveis de crescimento foram avaliadas no último dia do segundo ciclo de déficit hídrico em todas as plantas (estádio fenológico $R_3$). A altura da planta foi mensurada a partir do coleto, na região de transição entre raiz e caule, rente ao solo, até o ápice do caule, com a utilização de régua graduada. O número de folhas por planta foi obtido por contagem direta, registrando-se todas as folhas plenamente expandidas.

As variáveis de produtividade foram avaliadas após a finalização do ensaio. O número de vagens e grãos por planta foi determinado por contagem direta. O peso dos grãos por planta foi mensurado em balança de precisão. A área foliar foi obtida com o auxílio do equipamento LI-3100 Área Meter (LI-COR, USA) e expressa em $cm^2$.

### 3.4 Procedimentos estatísticos

As variáveis analisadas foram submetidas à análise de variância (ANOVA), e, quando constatada significância, as médias foram comparadas pelo teste de Newman-Keuls a 5% de probabilidade, com o auxílio dos programas estatísticos R 4.0.1 (R CORE TEAM, 2020), RBio (BHERING, 2017).

## 4. RESULTADOS

Os parâmetros de crescimento das plantas de soja, representados pelo número de trifólios (NTR); altura da planta (AP); teor relativo de água (TRA); área foliar (AF) e área foliar específica (AFE), apresentaram efeito significativo dos tratamentos, com exceção do NTR (Tabela 2). Os coeficientes de variação (CV) variaram de baixos a moderados, indicando adequada precisão experimental.

**Tabela 2.** Análise de variância e teste de média para as variáveis número de trifólios (NTR), altura da planta (AP), teor relativo de água (TRA), área foliar (AF) e área foliar específica (AFE) de plantas de soja submetidas a diferentes graus de déficit hídrico.

| **Fontes de variação** | **Quadrado médio** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **GL** | **NTR** | **AP** | **TRA** | **AF** | **AFE** |
| Tratamento | 4 | $28.47^{ns}$ | $31.82^{**}$ | $1660.80^{**}$ | $965.47^{**}$ | $54.62^{**}$ |
| Resíduo | 25 | 23.55 | 5.73 | 36.80 | 111.01 | 7.33 |
| Total | 29 | - | - | - | - | - |
| CV (%) | - | 15.71 | 5.74 | 9.46 | 11.73 | 12.07 |
| **Tratamentos** | | **Teste de média** | | | | |
| Controle | | 33.33 a | 45.67 a | 82.61 a | 83.35 bc | 20.18 b |
| Severo | | 27.50 a | 41.33 b | 46.51 c | 93.35 b | 23.82 b |
| Moderado | | 31.67 a | 41.25 b | 46.70 c | 74.46 c | 27.12 a |
| Brando | | 30.33 a | 40.54 b | 75.08 b | 108.61 a | 20.81 b |
| Suave | | 31.67 a | 39.75 b | 69.75 b | 89.37 bc | 20.23 b |

$^{ns}$ não significativo pelo teste F. $^{*}$ significativo a 5% pelo teste F; $^{**}$ significativo a 1% pelo teste F.
Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Newman-Keuls.

Para a variável altura de plantas (AP), os tratamentos submetidos ao déficit hídrico não diferiram entre si, independentemente da intensidade da restrição hídrica aplicada. Entretanto, as plantas mantidas sob irrigação apresentaram maiores valores de altura em comparação aos tratamentos sob limitação hídrica.

O teor relativo de água (TRA) foi reduzido em todos os tratamentos submetidos ao déficit hídrico em comparação ao controle. As condições de déficit suave e brando promoveram reduções entre 25 e 28% no TRA das plantas. Já os tratamentos severo e moderado apresentaram os menores valores da variável, com reduções próximas de 43% em relação às plantas mantidas sob irrigação.

Para a área foliar (AF), o tratamento sob déficit hídrico brando apresentou os maiores valores, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. Em contraste, o déficit moderado promoveu a maior redução da variável, com decréscimo de aproximadamente 22% em relação

ao controle. Em relação à área foliar específica (AFE), observou-se aumento significativo apenas no tratamento moderado, com incremento de 23% em comparação ao controle, indicando alterações na relação entre área foliar e massa seca. Os demais tratamentos não diferiram estatisticamente entre si.

Os resultados das variáveis fisiológicas e bioquímicas, incluindo clorofila total (Cltotal), carotenoides (Car), peroxidase (POD), catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD) e a relação SOD/CAT, estão apresentados na Tabela 3.

Os tratamentos submetidos ao déficit hídrico apresentaram aumento nos teores de clorofila total (Cltotal) em relação ao controle, com destaque para o déficit moderado, que promoveu incremento de 47% na variável. Os déficits suave, severo e brando resultaram em aumentos de 23%, 18% e 16%, respectivamente, em comparação às plantas irrigadas. Resultado semelhante foi observado para os carotenoides (Car), cujo maior valor ocorreu sob déficit moderado, com aumento de 42% em relação ao controle.

**Tabela 3.** Análise de variância e teste de média para as variáveis clorofila total (Cltotal), carotenoides (Car), peroxidase (POD), catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD) e relação superóxido dismutase e catalase (SOD/CAT) de plantas de soja submetidas a diferentes graus de déficit hídrico.

| **Fontes de variação** | **Quadrado médio** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **GL** | **Cltotal** | **Car** | **POD** | **CAT** | **SOD** | **SOD/CAT** |
| Tratamento | 4 | 1.67$^{**}$ | 0.03$^{*}$ | 0.001$^{ns}$ | 1846.12$^{**}$ | 13903.40$^{**}$ | 0.34$^{**}$ |
| Resíduo | 25 | 0.18 | 0.01 | 0.001 | 27.72 | 372.90 | 0.01 |
| Total | 29 | - | - | - | - | - | - |
| CV (%) | - | 11.28 | 15.55 | 100.07 | 3.20 | 18.50 | 12.80 |
| **Tratamentos** | | | | | | | |
| Controle | | 3.10 c | 0.48 b | 0.01 a | 191.83 a | 184.40 a | 0.87 a |
| Severo | | 3.65 bc | 0.61 ab | 0.02 a | 171.22 b | 73.37 c | 0.26 d |
| Moderado | | 4.56 a | 0.68 a | 0.03 a | 157.63 c | 115.09 b | 0.73 b |
| Brando | | 3.60 bc | 0.55 ab | 0.01 a | 155.13 c | 72.91 c | 0.47 c |
| Suave | | 3.80 b | 0.59 ab | 0.05 a | 147.07 d | 76.11 c | 0.52 c |

$^{ns}$ não significativo pelo teste F. $^{*}$ significativo a 5% pelo teste F; $^{**}$ significativo a 1% pelo teste F.
Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Newman-Keuls.

Em relação às enzimas antioxidantes, observou-se resposta diferenciada entre os tratamentos submetidos ao déficit hídrico. Para a atividade da catalase (CAT), verificou-se redução da atividade enzimática nos tratamentos sob restrição hídrica em comparação ao controle. Entretanto, entre os tratamentos submetidos ao déficit, o regime severo apresentou maior atividade da enzima entre os tratamentos sob déficit hídrico, com redução de aproximadamente 11% em relação ao controle. Os déficits moderado, brando e suave apresentaram reduções de 18%, 19% e 23%, respectivamente.

A atividade da superóxido dismutase (SOD) foi reduzida em todos os tratamentos submetidos ao déficit hídrico. Os tratamentos severo, brando e suave não diferiram

estatisticamente entre si, apresentando reduções médias próximas de 60% em relação ao controle. Já o déficit moderado promoveu redução menos acentuada da atividade enzimática, com decréscimo médio de 38%.

A relação SOD/CAT foi influenciada pelos regimes de déficit hídrico, apresentando reduções em todos os tratamentos em comparação ao controle. O déficit severo promoveu a maior redução da relação SOD/CAT, com decréscimo de aproximadamente 70%, seguido pelos déficits brando (46%), suave (40%) e moderado (16%).

Os resultados das variáveis produtivas da soja, incluindo número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP), peso de grãos por planta (PGP), peso de 100 grãos (P100g) e relação entre área foliar específica e número de grãos (AFE–NG), estão apresentados na Tabela 4. Houve efeito significativo dos tratamentos para NVP, NGP, P100g e AFE–NG. Os coeficientes de variação inferiores a 20% indicaram adequada precisão experimental.

**Tabela 4.** Análise de variância e teste de média para as variáveis número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP), peso de grãos por planta (PGP), peso de 100 grãos (P100g) e relação área foliar específica e produção (AFE-NG) de plantas de soja submetidas a diferentes graus de déficit hídrico.

| **Fontes de variação** | **Quadrado médio** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **GL** | **NVP** | **NGP** | **PGP** | **P100g** | **AFE-NG** |
| Tratamento | 4 | 74.20$^{**}$ | 499.58$^{**}$ | 9.13$^{ns}$ | 25.10$^{**}$ | 0.005$^{*}$ |
| Resíduo | 25 | 17.18 | 102.63 | 4.43 | 2.17 | 0.001 |
| Total | 29 | - | - | - | - | - |
| CV (%) | - | 9.27 | 8.82 | 9.33 | 7.44 | 17.56 |
| **Tratamentos** | **Teste de média** | | | | | |
| Controle | | 47.33 a | 125.33 a | 20.82 a | 16.57 c | 0.16 b |
| Severo | | 44.33 a | 110.00 ab | 22.98 a | 20.89 ab | 0.22 ab |
| Moderado | | 47.83 a | 119.83 a | 22.70 a | 19.03 b | 0.23 a |
| Brando | | 39.00 b | 101.83 b | 22.10 a | 21.73 a | 0.20 ab |
| Suave | | 45.00 a | 117.17 a | 24.18 a | 20.69 ab | 0.17 b |

$^{ns}$ não significativo pelo teste F. $^{*}$ significativo a 5% pelo teste F; $^{**}$ significativo a 1% pelo teste F.
Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Newman-Keuls.

Para o número de vagens por planta (NVP), os tratamentos submetidos ao déficit hídrico não diferiram do controle, com exceção do déficit brando, que promoveu redução de aproximadamente 17% na variável. Comportamento semelhante foi observado para o número de grãos por planta (NGP), no qual o déficit brando apresentou o menor valor, com redução de 19% em relação ao controle, seguido pelo déficit severo. Os demais tratamentos não diferiram estatisticamente entre si.

O peso de 100 grãos (P100g) foi influenciado pelos regimes de déficit hídrico. Em comparação ao controle, os tratamentos brando, severo e suave apresentaram aumento da variável, com destaque para o déficit brando, que promoveu incremento de aproximadamente 31%.

A relação entre área foliar específica e número de grãos (AFE–NG) apresentou aumento nos tratamentos submetidos ao déficit hídrico em comparação ao controle, com destaque para o déficit moderado, que promoveu incremento de aproximadamente 44% na variável. Os tratamentos severo e brando apresentaram valores intermediários, enquanto o déficit suave não diferiu estatisticamente do controle.

A análise multivariada por variáveis canônicas explicou 91,30% da variância total dos dados, sendo 70,50% atribuídos à Can1 e 20,80% à Can2, indicando adequada representatividade bidimensional das variáveis avaliadas. A análise canônica permitiu a formação de dois grupos distintos de tratamentos em função das respostas fisiológicas, bioquímicas e produtivas observadas.

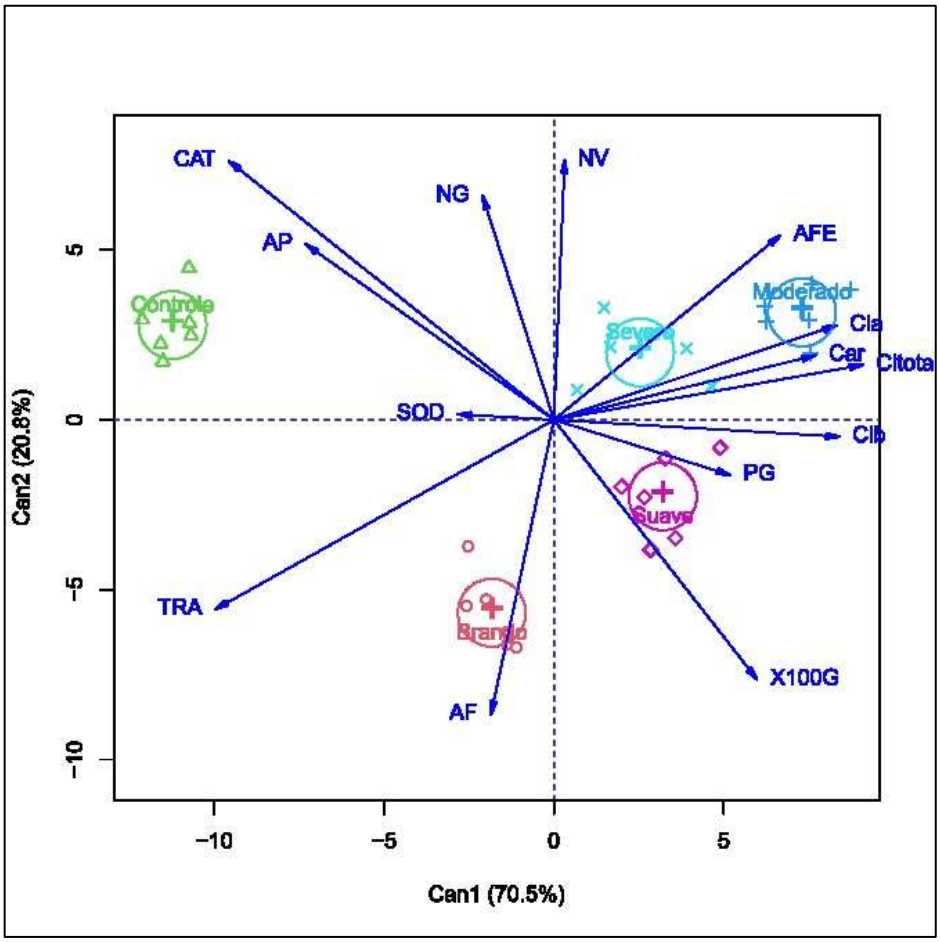



**Figura 2.** Análise de variáveis canônicas das relações entre variáveis fisiológicas, bioquímicas e produtivas em plantas de soja submetidas a distintos níveis de déficit hídrico.

O eixo 1 da análise canônica promoveu a separação dos tratamentos em dois agrupamentos principais, envolvendo controle e déficit brando em oposição aos déficits moderado e severo. O agrupamento controle/brando esteve associado principalmente às variáveis bioquímicas CAT e SOD, além das variáveis morfológicas altura de plantas (AP) e número de grãos (NGP), sendo a área foliar (AF) a variável com maior contribuição para o posicionamento do déficit brando nesse grupo. Em contraste, os déficits moderado e severo apresentaram maior proximidade entre si, estando associados principalmente às variáveis fisiológicas e produtivas, como clorofila total (Cltotal), área foliar específica (AFE), número de grãos (NGP) e número de vagens (NVP).

A Tabela 5 apresenta uma síntese das médias das variáveis de crescimento, fisiológicas, bioquímicas e produtivas de plantas de soja submetidas a diferentes regimes de déficit hídrico.

**Tabela 5.** Síntese das médias das variáveis de crescimento, fisiológicas, bioquímicas e produtivas de plantas de soja submetidas a diferentes regimes de déficit hídrico.

| **1. CRESCIMENTO** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Tratamento** | **NTR** | **AP** | **TRA** | **AF** | **AFE** |
| Controle | 33.33 a | 45.67 a | 82.61 a | 83.35 bc | 20.18 b |
| Severo | 27.50 a | 41.33 b | 46.51 c | 93.35 b | 23.82 b |
| Moderado | 31.67 a | 41.25 b | 46.70 c | 74.46 c | 27.12 a |
| Brando | 30.33 a | 40.54 b | 75.08 b | 108.61 a | 20.81 b |
| Suave | 31.67 a | 39.75 b | 69.75 b | 89.37 bc | 20.23 b |

| **2. FISIOLOGIA E BIOQUÍMICA** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Cltotal** | **Car** | **POD** | **CAT** | **SOD** | **SOD/CAT** |
| Controle | 3.10 c | 0.48 b | 0.01 a | 191.83 a | 184.40 a | 0.87 a |
| Severo | 3.65 bc | 0.61 ab | 0.02 a | 171.22 b | 73.37 c | 0.26 d |
| Moderado | 4.56 a | 0.68 a | 0.03 a | 157.63 c | 115.09 b | 0.73 b |
| Brando | 3.60 bc | 0.55 ab | 0.01 a | 155.13 c | 72.91 c | 0.47 c |
| Suave | 3.80 b | 0.59 ab | 0.05 a | 147.07 d | 76.11 c | 0.52 c |

| **3. PRODUTIVIDADE** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **NVP** | **NGP** | **PGP** | **P100g** | **AFE-NG** |
| Controle | 47.33 a | 125.33 a | 20.82 a | 16.57 c | 0.16 b |
| Severo | 44.33 a | 110.00 ab | 22.98 a | 20.89 ab | 0.22 ab |
| Moderado | 47.83 a | 119.83 a | 22.70 a | 19.03 b | 0.23 a |
| Brando | 39.00 b | 101.83 b | 22.10 a | 21.73 a | 0.20 ab |
| Suave | 45.00 a | 117.17 a | 24.18 a | 20.69 ab | 0.17 b |

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Newman-Keuls.

De modo geral, os tratamentos severo e moderado apresentaram os menores valores de teor relativo de água (TRA), indicando maior impacto da restrição hídrica. Entretanto, diferenças importantes foram observadas entre esses tratamentos em variáveis fisiológicas, estruturais e produtivas. Embora ambos tenham apresentado reduções semelhantes no TRA, o déficit severo manteve maior área foliar e desempenho produtivo comparável ou superior ao

moderado em algumas variáveis, como o peso de 100 grãos. Entre os tratamentos brando e suave, observou-se comportamento variável, com destaque para o déficit brando, que apresentou maior área foliar e maior peso de 100 grãos, embora tenha apresentado redução em componentes produtivos como número de vagens e número de grãos por planta. De forma integrada, os resultados evidenciam respostas distintas da cultivar de soja frente aos diferentes regimes de déficit hídrico.

## 5. DISCUSSÃO

A manutenção parcial dos parâmetros de crescimento vegetativo observada neste estudo indica que o déficit hídrico não interrompeu completamente o desenvolvimento da soja, mas promoveu respostas de ajuste morfofisiológico. Apesar da redução no teor relativo de água e na altura de plantas, a cultivar Neo 690 manteve parte da estrutura vegetativa e da área foliar, sugerindo plasticidade fisiológica frente ao estresse hídrico. Resultados semelhantes foram descritos por Yavas et al. (2024) e Wang et al. (2025), que associaram a manutenção parcial do crescimento da soja sob déficit hídrico à elevada plasticidade fisiológica da cultura. Segundo Felisberto et al. (2023), Hossain et al. (2024) e Ergin et al. (2025), respostas dessa natureza estão associadas à manutenção da funcionalidade metabólica e do aparato fotossintético sob condições de restrição hídrica.

De modo geral, os tratamentos mais restritivos, especialmente severo e moderado, apresentaram respostas distintas frente à limitação hídrica. Embora ambos tenham exibido reduções semelhantes no teor relativo de água, o tratamento severo manteve maior área foliar em comparação ao moderado. Em relação aos componentes produtivos, o déficit severo também apresentou desempenho comparável ou superior em algumas variáveis, como o peso de 100 grãos. Esses resultados sugerem que exposições sucessivas ao estresse hídrico podem ter favorecido respostas fisiológicas mais eficientes no tratamento severo, compatíveis com mecanismos de memória fisiológica.

Nos tratamentos brando e suave, observou-se maior variabilidade nas respostas fisiológicas e produtivas. Em algumas variáveis, o déficit brando apresentou desempenho superior ao suave, como observado para área foliar e peso de 100 grãos. Entretanto, o mesmo tratamento apresentou reduções em componentes produtivos, como número de vagens e número de grãos por planta. Esse comportamento sugere que os diferentes regimes de restrição hídrica e reidratação podem ter promovido respostas fisiológicas distintas ao longo do ciclo da cultura. Estudos recentes indicam que exposições intermitentes ao déficit hídrico podem modular mecanismos de aclimatação fisiológica e influenciar respostas estruturais e produtivas em plantas submetidas ao estresse hídrico (Villagómez-Aranda et al., 2022; Nguyen et al., 2024).

Em relação às respostas bioquímicas, os resultados indicam alterações fisiológicas associadas à resposta da soja ao déficit hídrico. O aumento nos teores de clorofila total e carotenoides, especialmente no tratamento moderado, sugere respostas relacionadas à manutenção dos fotossistemas sob condições de estresse. Segundo Bester et al. (2024), a dissipação de energia luminosa atua como importante mecanismo de proteção fotossintética em plantas submetidas à limitação hídrica. De forma complementar, Lin et al. (2024) e Qiao et al.

(2024) destacam a atuação das defesas antioxidantes na manutenção da estabilidade fotoquímica e na redução de danos oxidativos. Wang et al. (2024) associam padrões fisiológicos semelhantes a respostas adaptativas relacionadas à aclimatação e possível memória fisiológica em condições de déficit hídrico.

Alterações na atividade das enzimas antioxidantes também foram observadas sob déficit hídrico, especialmente pela redução da atividade da SOD e pelas variações na relação SOD/CAT. Os tratamentos severo, brando e suave apresentaram reduções mais acentuadas da SOD em relação ao controle, enquanto o déficit moderado apresentou menor redução relativa da atividade enzimática. Apesar disso, o tratamento moderado esteve associado às menores médias de área foliar, enquanto o déficit severo manteve maior área foliar, maior atividade relativa da CAT e desempenho produtivo comparável ou superior em algumas variáveis, como o peso de 100 grãos. A manutenção relativa da atividade da CAT no tratamento severo pode estar associada ao aumento da detoxificação de $H_2O_2$ gerado sob maior intensidade de restrição hídrica, possivelmente relacionado ao incremento da fotorespiração em condições de estresse. Esses resultados sugerem que os diferentes regimes de déficit hídrico promoveram respostas antioxidantes e funcionais distintas na cultivar estudada.

Nesse contexto, os resultados obtidos sugerem que exposições sucessivas ao déficit hídrico podem modular respostas fisiológicas associadas à aclimatação das plantas sob restrição hídrica. Estudos conduzidos por Kaur et al. (2021) demonstram que déficits hídricos sucessivos podem induzir mecanismos fisiológicos capazes de aumentar a tolerância ao estresse. De forma complementar, Villagómez-Aranda et al. (2022), Nguyen et al. (2024), Zhao et al. (2024) e Akter et al. (2025) destacam que tais respostas representam importantes mecanismos adaptativos frente à limitação hídrica, podendo estar associadas à memória fisiológica.

As evidências experimentais observadas neste estudo indicam integração entre crescimento vegetativo, respostas bioquímicas e componentes produtivos, demonstrando interação entre esses processos sob déficit hídrico. A manutenção parcial da área foliar e de variáveis produtivas, mesmo sob redução do estado hídrico, sugere respostas funcionais associadas à tolerância da cultivar às condições de restrição hídrica. Segundo Kodadinne Narayana et al. (2024) e Vadera, Pandya e Mehta (2025), alterações no crescimento vegetativo e no metabolismo antioxidante podem contribuir para a manutenção do enchimento de grãos e redução das perdas produtivas em plantas submetidas ao estresse hídrico.

Adicionalmente, exposições prévias ao estresse hídrico podem induzir estados fisiológicos previamente condicionados, frequentemente associados à memória fisiológica em plantas (Galviz et al., 2022). Segundo Haghpanah et al. (2024) e Poudel et al. (2024), esses mecanismos podem favorecer respostas subsequentes mais eficientes frente ao déficit hídrico,

contribuindo para a manutenção da estabilidade fisiológica, da proteção antioxidante e do crescimento funcional. Os resultados observados no presente estudo, especialmente no tratamento severo, apresentaram comportamento compatível com essas respostas adaptativas descritas na literatura.

De modo geral, a cultivar Neo 690 apresentou elevada capacidade de ajuste frente às condições de déficit hídrico, evidenciada pela integração entre respostas morfológicas, bioquímicas e produtivas. Os resultados obtidos sugerem a ocorrência de mecanismos fisiológicos compatíveis com processos de aclimatação e possível memória fisiológica sob condições de restrição hídrica sucessiva. Entretanto, condições mais intensas de restrição hídrica ainda podem comprometer processos fisiológicos relacionados à atividade fotossintética e aos componentes produtivos da cultura, conforme descrito por Poudel et al. (2023) e Rahman et al. (2025). Dessa forma, a integração entre respostas estruturais, antioxidantes e produtivas reforça o potencial adaptativo da cultura frente à variabilidade hídrica, especialmente em cenários de veranicos frequentes na região Centro-Oeste e no contexto das mudanças climáticas.

## 5. CONCLUSÃO

A cultivar de soja Neo 690 apresentou respostas morfológicas, bioquímicas e produtivas distintas frente aos diferentes regimes de déficit hídrico. Mesmo sob redução do estado hídrico, observou-se manutenção parcial da área foliar, modulação da atividade antioxidante e estabilidade relativa de componentes produtivos, especialmente no tratamento severo. Os resultados obtidos sugerem a ocorrência de mecanismos fisiológicos compatíveis com processos de possível memória fisiológica sob condições de restrição hídrica sucessiva. Dessa forma, a cultivar demonstrou potencial adaptativo frente à variabilidade hídrica, evidenciando a importância da compreensão dessas respostas fisiológicas para o manejo da cultura em cenários de veranicos frequentes e mudanças climáticas.

# 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


AKTER, S. E. et al. Characterization of morpho-physiological responses of soybean genotypes to water stress. **Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology,** v. 13, n. 9, p. 2686-2690, 2025. DOI: https://doi.org/10.24925/turjaf.v13i9.2686-2690.7804

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration**: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998.

ALI, S. et al. Exploring physiological and molecular dynamics of drought stress responses in plants: challenges and future directions. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, n. 1, p. 1565635, 2025. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1565635

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014. DOI: https://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507.

ALVES, F. A. F.; *et al*. Impactos de mudanças climáticas para a fisiologia e morfologia vegetal e à sociedade. **Revista Ambientale**, v. 16, n. 1, p. 24-36, 2024. DOI: 10.48180/ambientale.v16i1.560.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Monitor de Secas: Atualização da situação de seca em Goiás.** Brasília: ANA, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/seca-fica-mais-branda-e-area-com-o-fenomeno-se-mantem-estavel-no-brasil-conforme-a-ultima-atualizacao-do-monitor-de-secas . Acesso em: 05 fev. 2026.

ARIF, M. et al. Evaluating the impacts of environmental stresses on agriculture in the context of climate resilience. **Plant Molecular Biology**, v. 115, n. 4, p. 73, 2025. DOI: 10.1007/s11103-025-01598-2

BATISTA, F. S.; DUKU, C.; HEIN, L. Deforestation-induced changes in rainfall decrease soybean-maize yields in Brazil. **Ecological Modelling**, v. 486, e110533, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110533.

BEAUCHAMP, C.; FRIDOVICH, I. Superoxide dismutase improved as says and as say applicable to acrylamide gels. **Analytical Biochemistry**, v. 44, p. 276-287, 1971. DOI: 10.1016/0003-2697(71)90370-8.

BESTER, A. U. et al. Physiological mechanisms of cross-stress and memory in soybean plants subjected to water deficit and waterlogging. **Environmental and Experimental Botany**, v. 222, p. 105749, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105749

BHERING, L. L. R. Bio: A tool for biometric and statistical analysis using the R platform. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.17, p.187-190, 2017.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the qualification of microgram quantities of protein utilize the principle of protein dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 7, p. 248-254, 1976. DOI: 10.1006/abio.1976.9999.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Histórico de perdas na agricultura brasileira: 2000-2021**. Brasília: MAPA/AECS, 2022. 1. ed. 111p.

CAETANO, L. R. et al. Influência do veranico na demanda hídrica da soja cultivada em três safras no Centro Oeste brasileiro. **Peer Review**, v. 5, n. 24, p. 363–379, 2023. DOI: 10.53660/1414.prw2932.

CARVALHO, R. C. P. et al. Technological innovations and development of new markets in soybean cultivation. **Editora Impacto Científico**, v. 2, n. 1, p. 179-191, 2025. DOI: https://doi.org/10.56238/

CEPEA; ABIOVE. **Relatório – Cadeia da Soja e biodiesel: PIB, empregos e comércio exterior.** ESALQ/USP & Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, 2025. (Relatórios trimestrais). Disponível em: https://abiove.org.br/abiove_content/Abiove/Relatorio-Cadeia-da-Soja-e-biodiesel-1T2025.pdf. Acesso em: 10 de dez. de 2025.

CHAND, S. *et al*. Plant-Environment Interaction in Developing Crop Species Resilient to Climate Change. In: AFTAB, T.; HAKEEM, K. R. (eds). **Plant Abiotic Stress Physiology**. New York: Apple Academic Press, 2022.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira – grãos**: 12º levantamento, setembro 2025. Safra 2024/25. Brasília: CONAB. 2025.

DESA, S. et al. Plant-Environment Interactions: Proteomics, Metabolomics and Genetic Engineering Perspective. In: AFTAB, T. (eds). **New Frontiers in Plant-Environment Interactions**. Environmental Science and Engineering. Cham: Springer, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-43729-8_2.

DU, X. et al. Drought stress reduces the photosynthetic source of soybean seed formation via weakening source–sink relationship. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, e 1337544, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1337544.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2009.

ERGIN, N. et al. Morpho-physiological and water use performance of soybean cultivars under drought stress at early growth stages. **International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences**, v. 9, n. 1, p. 13–21, 2025. DOI: 10.21475/ajcs.23.17.09.p3965

FALCIONI, R. et al. Progressive water deficit impairs soybean growth, alters metabolic profiles, and decreases photosynthetic efficiency. **Plants**, v. 14, n. 17, p. 2615, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/plants14172615.

FAO. **FAOSTAT Statistical Database: Crops and livestock products.** Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2025. Acesso em: 10 de dezembro de 2025. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/%5C%3E.

FELISBERTO, G. et al. Physiological and yield responses of soybean under water deficit. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, v. 26, n. 1, p. 27–37, 2023. DOI: 10.1007/s12892-022-00157-1

FERREIRA, R. C. et al. Soybean yield losses related to drought events in Brazil: spatial–temporal trends over five decades and management strategies. **Agriculture**, v. 14, n. 12, p. 2144, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture14122144.

FIORINI, A. C. O. et al. How climate change is impacting the Brazilian agricultural sector: evidence from a systematic literature review. **Environmental Research Letters**, v. 19, n. 8, p. 083001, 2024. DOI: https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad5f42

FREITAS, R. S.; SILVA, E. C. Unveiling the influence of stress memory: enhancing stress tolerance in seedlings through seed stage stress exposure. **Plant Physiology Reports**, v. 29, n. 1, p. 165-175, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s40502-023-00751-7

GALVIZ, Y. et al. The biological concept of stress revisited: relations of stress and memory of plants as a matter of space–time. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 34, p. 329-264, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s40626-022-00245-1.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Purification and quantitative relationship with water soluble protein in seedlings. **Journal of Plant Physiology**, v. 48, p. 315-318, 1977. DOI: 10.1104/pp.59.2.315.

HAGHPANAH, M. et al. Drought tolerance in plants: physiological and molecular responses. **Plants (Basel, Switzerland)**, v. 13, n. 21, 2962, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/plants13212962.

HOSSAIN, M. S. et al. Differential drought responses of soybean genotypes in relation to photosynthesis and growth-yield attributes. **Plants**, v. 13, n. 19, p. 2765, 2024.

JHA, U. C. et al. Major abiotic stresses on quality parameters in grain legumes: Impacts and various strategies for improving quality traits. **Environmental and Experimental Botany**, v. 228, p. 105978, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105978

KAMBONA, C. M. et al. Stress memory and its regulation in plants experiencing recurrent drought conditions. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 136, n. 26, p. 1-21, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s00122-023-04313-1.

KAUR, H. et al. Scrutinizing the impact of water deficit in plants: Transcriptional regulation, signaling, photosynthetic efficacy, and management. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 935-962, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/ppl.13389

KHAN, A. A. et al. Mechanistic insights and future perspectives of drought stress management in staple crops. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, p. 1547452, 2025. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1547452

KODADINNE NARAYANA, N. et al. Resilience of soybean genotypes to drought stress during the early vegetative stage. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 17365, 2024. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-67930-w

KONG, R. S.; HENRY, H. A. L.; SMITH, N. G. No drought memory in cotton despite evidence of drought acclimation. **Oecologia**, v. 207, n. 10, p. 1-10, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s00442-025-05794-1

LIMA, E. A. et al. Atividade das enzimas SOD, CAT e APX e metabolismo dos lipídeos de membranas em dois cultivares de feijão-de-corda (*Vigna unguiculata* L. Walp) em condições de estresse salino. **Brazilian Journal of Development**, v.7, n.5, p. 48471-48488, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n5-312.

LIN, S. et al. Physiological regulation of photosynthetic-related indices, antioxidant defense, and proline anabolism on drought tolerance of wild soybean. **Plants**, v. 13, n. 6, p. 880, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/plants13060880

MONACO, H. et al. The economics of farming expansion in the Brazilian Cerrado under possible effects of climate change. **International Food and Agribusiness Management Review,** v. 27, n. 3, p. 441-462, 2024. DOI: https://doi.org/10.22434/IFAMR1028

NGUYEN, T. C. et al. Assessment of drought responses of wild soybean accessions at different growth stages. **Agronomy**, v. 14, n. 3, p. 471, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy14030471

NOIA JÚNIOR, R. S. N. et al. Negative impacts of climate change on crop yields are underestimated. **Trends in Plant Science**, v. 1, n. 1, p. 1-12, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tplants.2025.05.002

PENG, D. et al. Global soybean trade dynamics: Drivers, impacts, and sustainability. **The Innovation,** v. 7, n. 2, p. 101124, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.xinn.2025.101124

POUDEL, S. et al. Resilience of soybean cultivars to drought stress during flowering and early-seed setting stages. **Scientific Reports**, v. 13, e1277, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-023-28354-0.

POUDEL, S. et al. Negative synergistic effects of drought and heat during flowering and seed setting in soybean. **Environmental and Experimental Botany**, v. 222, p. 105769, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105769

PROCHNOW, L. I. et al. Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes. **Instituto Internacional de Nutrição de Plantas**, v. 3, p. 05-35, 2010.

QIAO, M. et al. Impacts of drought on photosynthesis in major food crops and the related mechanisms of plant responses to drought. **Plants**, v. 13, n. 13, p. 1808, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/plants13131808

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2025. Disponível em: http://www,R-project,org/, Acesso em: 06/05/2025.

RAHMAN, M. M. et al. Past trauma, better future: how stress memory shapes plant adaptation to drought. **Functional Plant Biology**, v. 52, n. 6, 2025. DOI: https://doi.org/10.1071/FP24355

SMITH, M. **Report on expert consultation on procedures from revision of FAO methodologies for crop water requirements.** Rome: FAO, 1991.

SOUZA, A. et al. Trends and hydroclimatic variability in Brazil. **Earth Systems and Environment**, v. 8, n. 4, p. 1877-1892, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s41748-024-00434-9

UMBURANAS, R. C. et al. Soybean production overview in Brazil: Yield improvements over time and prospects. In: **Soybean Production Technology: Physiology, Production and Processing**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. p.105-124.

USDA Foreign Agricultural Service. (2025). **Soybean production and trade data**. U.S. Departament of Agriculture. Disponível em: https://www.fas.usda.gov/data/oilseeds-world-markets-and-trade-11102025. Acesso em: 10 de dezembro de 2025.

VADERA, H.; PANDYA, J.; MEHTA, S. A review: The elucidation of source-sink relationship. **Life Sciences Leaflets**, v. 179, n. 1, p. 12-35, 2025.

VILLAGÓMEZ-ARANDA, A. L. et al. Activating stress memory: Eustressors as potential tools for plant breeding. **Plant Cell Reports**, v. 41, n. 7, p. 1481-1498, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s00299-022-02858-x.

WANG, C. et al. Drought and rewatering effects on soybean photosynthesis, physiology and yield. **PeerJ**, v. 13, e19658, 2025. DOI: http://doi.org/10.7717/peerj.19658.

WANG, H. Y. et al. In-depth analysis of physiological, biochemical, and molecular bases of drought tolerance in soybeans. **Legume Genomics and Genetics**, v. 15, n. 5, p. 257–269, 2024. DOI: 10.5376/lgg.2024.15.0025

WANG, L. et al. Physiological responses and variety screening for drought tolerance in soybeans during flowering and podding. **Genomics and Applied Biology**, v. 15, n. 6, p. 308-318, 2024. DOI: 10.5376/gab.2024.15.0032

WANG, Y. et al. Differential antioxidant enzyme responses of maize leaves under continuous and intermittent drought stress. **Physiologia Plantarum**, v. 174, n. 3, p. e13709, 2022. DOI: 10.1111/ppl.13709.

WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, v.144, p. 307-313, 1994.

XU, Z. et al. Impact of drought stress on yield-related agronomic traits of different genotypes in spring wheat. **Agronomy**, v. 13, n. 12, p. 2968, 2023. DOI: 10.3390/agronomy13122968. MDPI

YAVAS, I. et al. Drought-Induced Changes in Leaf Morphology and Anatomy: Overview, Implications and Perspectives. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 33, n. 2, p. 1517-1530, 2024. DOI: 10.15244/pjoes/174476

ZERAIK, A. E. et al. Development of a spot test for peroxidase activity monitoring during a purification procedure. **Química Nova**, v.31, n.4, p.731-734, 2008. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000400003.

ZHAO, Y. et al. Impact of drought stress under different soil matrices on physiological characteristics of soybean seedlings. **AoB Plants**, v. 17, n. 4, p. 1-9, 2025. DOI: https://doi.org/10.1093/aobpla/plaf026

ZHU, Z. et al. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Plant Science**, v. 167, n. 3, p. 527-533, 2004. DOI: https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.04.020.