



ANE CAROLINE MELO FERREIRA

**O PAPEL DO SELÊNIO NA CULTURA DO GERGELIM
(*Sesamum indicum* L.): POTENCIAL DE BIOFORTIFICAÇÃO
E MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DO ESTRESSE HÍDRICO.**

**LAVRAS-MG
2025**

ANE CAROLINE MELO FERREIRA

**O PAPEL DO SELÊNIO NA CULTURA DO GERGELIM (*Sesamum indicum* L.):
POTENCIAL DE BIOFORTIFICAÇÃO E NA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DO
ESTRESSE HÍDRICO.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Fertilidade do solo e nutrição de plantas, para a obtenção do título de Doutor.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Ligia de Souza Silva

**LAVRAS-MG
2025**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Ferreira, Ane Caroline.

O papel do selênio na cultura do gergelim (*Sesamum indicum* L.) : Potencial de biofortificação e mitigação dos efeitos do estresse hídrico. / Ane Caroline Ferreira. - 2025.

104 p. : il.

Orientadora: Maria Lígia Silva

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2025.

Bibliografia.

1. Biofortificação agronômica. 2. Selenato de sódio. 3. Estresse abiótico. 4. Segurança alimentar. 5. Selênio orgânico. I. Silva, Maria Lígia. II. Universidade Federal de Lavras. III. Título.

ANE CAROLINE MELO FERREIRA

**O PAPEL DO SELÊNIO NA CULTURA DO GERGELIM (*Sesamum indicum* L.):
POTENCIAL DE BIOFORTIFICAÇÃO E NA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DO
ESTRESSE HÍDRICO.**

**THE ROLE OF SELENIUM IN SESAME (*Sesamum indicum* L.) CULTIVATION:
POTENTIAL FOR BIOFORTIFICATION AND MITIGATION OF WATER STRESS
EFFECTS.**

Tese apresentada à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Ciência do
Solo, Fertilidade do solo e nutrição de
plantas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 29 de abril de 2025.
Dra. Maria Ligia de Souza Silva - UFLA
Dr. Guilherme Vieira Pimental - UFLA
Dra. Gelza Carliane Marques Teixeira - UFLA
Dr. Arthur Bernardes Cecilio Filho - UNESP
Dr. Milton Ferreira de Moraes - UFMT

Profa. Dra. Maria Ligia de Souza Silva
Orientadora

**LAVRAS-MG
2025**

Dedico, primeiramente, à minha avó Izonete da Silva e Melo (In memórian), generosa, amorosa e sábia mesmo sem estudo. Que aprendeu com a vida a lutar por tudo que desejava e ensinou isso aos seus filhos. Ela acreditou em mim, investiu, incentivou e confiou todos os dias da minha vida. Minha parceira, confidente, conselheira, amiga, mãe e avó. A ela devo toda minha formação, pessoal e profissional, seus ensinamentos e histórias de vida jamais serão esquecidos. O meu amor é eterno e infinito.

Dedico também à minha mãe, Magna da Silva Melo, que foi firme e se manteve erguida comigo, me impulsionou em todos os momentos, apoiou de forma incondicional, como só uma mãe consegue fazer. Doce, carinhosa, dedicada e perfeita em tudo que faz, sempre pronta para ouvir e ensinar, até com o silêncio. Sublime, genial, um poema em pessoa, um abraço de vó, leva paz e leveza por onde passa, o eco de uma melodia que não se desfaz. Minha mãe, você é um exemplo de perseverança, resiliência e amor para mim e meus irmãos. Obrigada por segurar a minha mão sempre.

Dedico também às minhas tias Agna da Silva Melo e Irenilde da Silva Lima, que foram mais que importantes na minha formação ajudando minha avó a vender espetinho para manter os meus estudos. Tia Agna é a minha inspiração, dela eu tenho o maior orgulho e admiração pela profissional impecável e exemplar que é.

Por tanto respeito e encanto que tenho, quero ser professora igual ela, e se eu conseguir fazer um pouquinho do que ela faz, estarei mais que satisfeita. Ela foi uma das responsáveis por eu estar onde estou hoje, convenceu minha avó de investir nos meus estudos e foi firme nesse processo comigo, minha gratidão é infinita.

À minha tia Irenilde que tem um coração gigante e inspira por sua coragem, resiliência, força, determinação e vontade de viver a vida. Com ela eu aprendo todos os dias que as melhores coisas são as mais simples, um banho de rio, o balanço da rede, o café com cuscuz, a comida caseira da tia Irenilde, a música antiga interpretada por Sarajane. Obrigada por confiar em mim, e ser um porto seguro para todos nós, serei eternamente grata.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras pela minha formação.

À FAPEMIG pelo financiamento da bolsa de doutorado;

Ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo financiamento do meu projeto de pesquisa;

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo pela brilhante competência em formar profissionais de grande qualidade. E, principalmente, por se preocupar em cuidar de cada aluno com atenção e empatia, tenho certeza que é o diferencial que o faz ser admirado e tomado como exemplo;

Ao Departamento de Ciência do Solo por toda estrutura, formação e conhecimentos repassados;

A todos os professores que contribuíram para a minha formação e dos meus colegas, obrigada por todo conhecimento compartilhado;

À minha orientadora, Maria Lígia de Souza, por toda dedicação, ensinamentos, conselhos e principalmente por toda paciência que teve comigo durante os obstáculos que enfrentei. Serei eternamente grata!

À Embrapa algodão, representada pela pesquisadora Nair Helena Castro Arriel, por disponibilizar os materiais genéticos de gergelim para a condução desta pesquisa;

Ao meu grupo de pesquisa que foi primordial para que minha pesquisa fosse consolidada. Pois quando um atleta ganha uma medalha, ele nunca ganha sozinho. O fruto dessa conquista eu compartilho com todos eles, Amanda Chales, Fabrício Gomes, Edinei Armani, Francis, Olivia Bibiana, Pedro, Luiz, Karol, Sofia, Anderson e todos os outros que passaram. Obrigada sempre.

Aos professores Paulo Marchiori e Vitor Nascimento por toda contribuição na fisiologia e bioquímica de plantas. E ao professor Guilherme Pimentel por todo auxílio com a cultura do gergelim. Para mim, são exemplos de profissionais.

Aos colegas de curso e da Universidade que me ajudaram de forma incondicional em toda trajetória do doutorado, seja na condução e análises dos experimentos, no vôlei e na vida, obrigada por todo apoio, Maria Cecília, Davi Tavares, Leônidas Canuto, Indira Oliveira, Pedro Benevenuto, Gabryel Silva, Thiago Costa, Elenildo Gomes, Jonas Cavalcante, Adriane Fonseca, Marcela Vieira, Larissa Brito, Maria Elisa,

Gabrielly Tavares, Mateus Portes, Priscilla Curtis, Raul Oliveira, Ana Luiza, Ana Claudia, Gabriela Campolina, Alex Caetano entre outros;

Aos técnicos do Departamento de Ciência do Solo, Aline Marques, Mariene Duarte, Geila Carvalho, Lívia Botelho, Alexandre Lima e Doroteo de Abreu por toda contribuição e auxílio; em especial à Aline Marques que foi de extrema importância para a consolidação dessa conquista, todo seu incentivo eu nunca vou esquecer e deixar de agradecer, muito obrigada!

A todos os profissionais da Universidade Federal de Lavras, em especial do Departamento de Ciência do Solo., técnicos, profissionais da limpeza, manutenção e administração.

Aos meus professores da graduação e mestrado, Artenisa Cerqueira Rodrigues, Gabriel Barbosa e Carlos Lima. Seus ensinamentos e amizade foram fundamentais para minha formação, vocês são exemplos de profissionais;

Ao meu orientador de iniciação científica, TCC e mestrado, Henrique Antunes de Souza, um dos maiores responsáveis por eu ter escolhido o caminho acadêmico e a pesquisa. Sigo admirando o seu trabalho cada dia mais e me espelhando no profissional que ele é. Obrigada por todos os conselhos, por todo incentivo, por acreditar e confiar em mim sempre, e principalmente, por continuar sendo atencioso e dedicado com todos os seus orientados e ex-orientados;

À toda minha família por ter acreditado e confiado em mim durante esse processo. Em especial meu padrasto João Batista, meus irmãos, Ana Marina e Joao Luca, meu pai Franklin Duarte, meus tios, e meus primos Arthur, Samira, Savanna, Miguel, Naiara e Kelwy;

Ao meu amado namorado, Thales Mendonça, que foi mais que um companheiro, foi paciente, cuidadoso, me incentivou, foi meu melhor amigo em todos os momentos, acreditou em mim mais qualquer pessoa nesse mundo. Me deu uma família em Minas Gerais que me acolheu e recebeu de braços abertos, não tenho palavras para descrever tamanha gratidão por tudo. Por mais que eu agradeça, nunca será o suficiente, amo você para todo o sempre;

Por fim, e não menos importante, à mim... por ter resistido e continuado a nadar nas grandes ondas desse mar impetuoso, desafiante e encantador que é o doutorado.

*“A vida é combate,
Que os fracos abate,
Que os fortes, os bravos
Só pode exaltar!”*

(Gonçalves Dias)

RESUMO

O gergelim (*Sesamun indicum* L.) tem ganhado destaque nos últimos anos nos cenários nacional e internacional em virtude do valor nutricional do grão e elevado teor de óleo com alta qualidade. Nesse contexto, o selênio surge como elemento estratégico, por ser essencial à saúde humana e apresentar efeitos benéficos sobre as plantas, especialmente em condições adversas. O objetivo do primeiro estudo foi avaliar o potencial de biofortificação agronômica com selênio na cultura do gergelim. O experimento foi conduzido utilizando um delineamento experimental em blocos casualizados em esquema fatorial 2×5 , com quatro repetições. Os tratamentos consistiram na aplicação de cinco doses de Se (0, 25, 50, 100 e 200 μg vaso⁻¹), na forma de selenato de sódio (Na_2SeO_4), em duas cultivares de gergelim (BRS Anahí e Seda). Foram avaliados a matéria seca da parte aérea e dos grãos, a produtividade e a translocação de Se e outros nutrientes essenciais para as plantas. A análise estatística foi realizada utilizando ANOVA, com médias comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). A aplicação de Se impactou positivamente a produção de grãos, aumentando sua produtividade em até 40% na dose de 25 μg vaso⁻¹. O teor de Se nos grãos ocorreu de forma crescente conforme aumentavam as doses aplicadas, demonstrando viabilidade para biofortificação agronômica. A dose de 25 μg vaso⁻¹ mostrou-se mais adequada, pois promoveu ganhos produtivos e nutricionais sem induzir efeitos negativos na cultura. O objetivo do segundo estudo foi investigar como diferentes fontes de Se influenciam a tolerância do gergelim ao déficit hídrico prolongado, avaliando respostas fisiológicas, bioquímicas, nutricionais e produtivas. O experimento foi realizado em delineamento de blocos ao acaso em esquema fatorial 4×2 , com quatro repetições. Foram testadas fontes de Se (mineral, orgânica e blend – mineral+orgânica) e controle (sem aplicação de Se) sob dois manejos hídricos (déficit hídrico e irrigado). Foram realizadas análises fisiológicas, nutricionais e de produção. A análise estatística foi realizada utilizando ANOVA, com médias comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). O déficit hídrico impactou significativamente todos os parâmetros avaliados, mas a aplicação de Se demonstrou efeitos benéficos, principalmente com a fonte mineral, promovendo a recuperação das plantas após o período de estresse. O acúmulo de Se nos grãos ocorreu de forma eficiente em todas as fontes aplicadas, apesar do déficit hídrico limitar sua translocação em algumas fontes. Apesar disso, o Se não foi suficiente para evitar totalmente as perdas na produção sob déficit hídrico, independente da fonte. Embora o Se não elimine os efeitos negativos do déficit hídrico sobre a produção, ele ajuda a manter a funcionalidade fisiológica, ativa defesas antioxidantes e permite a biofortificação agronômica em condições adversas.

Palavras-chave: biofortificação agronômica; selenato de sódio; estresse abiótico; segurança alimentar; selênio orgânico.

ABSTRACT

Sesame (*Sesamum indicum* L.) has gained prominence in recent years on both national and international stages due to the nutritional value of its seeds and their high content of high-quality oil. In this context, selenium (Se) emerges as a strategic element, being essential for human health and exhibiting beneficial effects on plants, especially under adverse conditions. The objective of the first study was to evaluate the potential of agronomic biofortification with selenium in sesame cultivation. The experiment was carried out using a randomized block design in a 2×5 factorial scheme with four replications. Treatments consisted of five Se doses (0, 25, 50, 100, and 200 μg pot), applied as sodium selenate (Na_2SeO_4), in two sesame cultivars (BRS Anahí and Seda). The variables assessed included shoot and seed dry matter, productivity, and translocation of Se and other essential plant nutrients. Statistical analysis was performed using ANOVA, and means were compared using Tukey's test ($p \leq 0.05$). Se application positively impacted grain yield, increasing productivity by up to 40% at the 25 μg per pot dose. The Se content in the grains increased with higher application doses, demonstrating the viability of agronomic biofortification. The 25 μg per pot dose was the most suitable, as it enhanced both productivity and nutritional quality without causing adverse effects on the crop. The second study aimed to investigate how different Se sources influence sesame's tolerance to prolonged water deficit, assessing physiological, biochemical, nutritional, and productive responses. The experiment was conducted in a randomized block design with a 4×2 factorial arrangement and four replications. Se sources (mineral, organic, and a blend of both) and a control (no Se application) were tested under two water management regimes (water deficit and irrigation). Physiological, nutritional, and yield analyses were conducted, and statistical analysis followed the same ANOVA and Tukey's test procedure ($p \leq 0.05$). Water deficit significantly affected all evaluated parameters. However, Se application showed beneficial effects—particularly with the mineral source—by promoting plant recovery after the stress period. Se accumulation in grains was efficient across all sources, although water deficit limited translocation in some cases. Nonetheless, Se alone was not sufficient to completely prevent yield losses under drought conditions, regardless of source. While it may not eliminate the negative effects of water deficit on productivity, Se helps maintain physiological functionality, activates antioxidant defenses, and allows for agronomic biofortification even in adverse environments.

Keywords: agronomic biofortification; sodium selenate; abiotic stress; food security; organic selenium.

INDICADORES DE IMPACTO

O presente trabalho avaliou o papel do selênio (Se) na cultura do gergelim (*Sesamum indicum* L.) como estratégia agrônômica para biofortificação nutricional e mitigação dos efeitos do estresse causado por déficit hídrico, com forte impacto nas áreas de tecnologia e produção, saúde, meio ambiente e segurança alimentar. Os experimentos, realizados na Universidade Federal de Lavras, demonstraram que a aplicação de Se, pode aumentar a produtividade em até 40%, em condições ideais de cultivo, e favorecer o acúmulo de nutrientes essenciais para humanos nos grãos. Além disso, o Se mostrou-se eficiente na ativação de enzimas antioxidantes em condição de seca prolongada, promovendo a recuperação fisiológica das plantas e viabilizando a biofortificação mesmo em ambientes adversos. Esses resultados têm potencial de beneficiar toda população mundial, especialmente àquelas situadas em regiões de vulnerabilidade climática e/ou social. O cultivo do gergelim tem se expandido no Brasil e registrado aumento de 780% na produção entre 2018 e 2024. Os dados obtidos contribuem para a implementação de práticas de baixo custo, tecnicamente sustentáveis e com benefícios para todos os agricultores, cooperativas e sistemas produtivos de diversos níveis tecnológicos. A cadeia produtiva do gergelim, ao incorporar o Se, passa a integrar políticas de saúde e nutrição pública, combatendo a fome oculta e elevando o valor nutricional de um alimento com alto teor de óleo e micronutrientes. Dessa forma, os impactos do trabalho se alinham aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, especialmente os ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), ODS 3 (Saúde e bem-estar), ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima). A pesquisa também contribui para a Política Nacional de Extensão Universitária nas áreas temáticas de tecnologia e produção, saúde e meio ambiente, promovendo conhecimento técnico-científico aplicado e acessível, com forte potencial de transformação social, econômica e ambiental em regiões vulneráveis do Brasil.

IMPACT INDICATORS

This study evaluated the role of selenium (Se) in sesame cultivation (*Sesamum indicum* L.) as an agronomic strategy for nutritional biofortification and mitigation of drought-induced stress, with significant impact across the areas of technology and production, health, environment, and food security. The experiments, conducted at the Federal University of Lavras, demonstrated that Se application can increase productivity by up to 40% under ideal growing conditions and promote the accumulation of essential nutrients for human health in the seeds. Moreover, Se proved effective in activating antioxidant enzymes under prolonged drought conditions, supporting the physiological recovery of plants and enabling biofortification even in adverse environments. These results have the potential to benefit populations worldwide, especially those in regions facing climatic and/or social vulnerability. Sesame cultivation has been expanding in Brazil, with a 780% increase in production between 2018 and 2024. The data obtained support the implementation of low-cost, technically sustainable practices that benefit farmers, cooperatives, and production systems across various technological levels. By incorporating Se, the sesame production chain becomes integrated into public health and nutrition policies, helping to combat hidden hunger and enhancing the nutritional value of a food rich in oil and micronutrients. Thus, the impacts of this work align with the United Nations Sustainable Development Goals, particularly SDG 2 (Zero Hunger and Sustainable Agriculture), SDG 3 (Good Health and Well-being), SDG 12 (Responsible Consumption and Production), and SDG 13 (Climate Action). The research also contributes to Brazil's National University Extension Policy in the thematic areas of technology and production, health, and environment, promoting applied and accessible technical-scientific knowledge with strong potential for social, economic, and environmental transformation in vulnerable regions of the country.

SUMÁRIO

RESUMO.....	10
ABSTRACT	11
CAPITULO I	2
1. INTRODUÇÃO GERAL	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1. A cultura do gergelim.....	17
2.2. Selênio e sua importância	21
2.3. Efeitos do déficit hídrico em plantas	25
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
CAPÍTULO II - BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO GERGELIM (<i>Sesamum indicum</i> L.) COM SELÊNIO	33
RESUMO.....	34
1. INTRODUÇÃO.....	36
2. METODOLOGIA	38
2.1 Desenho experimental.....	38
2.2 Condições de cultivo	38
2.3 Amostragem, colheita e produção	39
2.4 Procedimento de digestão da amostra para análises elementares	40
2.5 Determinação dos elementos	40
2.6 Análise estatística.....	41
3. RESULTADOS	42
4. DISCUSSÃO.....	51
5. CONCLUSÃO	56
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
CAPÍTULO III – O SELÊNIO ATIVA O SISTEMA ANTIOXIDANTE DO GERGELIM (<i>Sesamun indicum</i> L.) SOB DÉFICIT HÍDRICO PROLONGADO.	61
RESUMO.....	62
1. INTRODUÇÃO	64
2. METODOLOGIA	66
2.1 Condições de condução do experimento e design experimental	66
2.2 Déficit hídrico.....	67
2.3 Trocas gasosas	70
2.4 Análises bioquímicas.....	70

2.5 Amostragem, colheita e produção	72
2.6 Procedimento de digestão da amostra para análises elementares	72
2.7 Determinação dos elementos	73
2.8 Análise estatística.....	73
3. RESULTADOS	75
4. DISCUSSÃO.....	88
5. CONCLUSÃO	96
7. CONSIDERACOES FINAIS.....	97
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98
APÊNDICE	104

CAPITULO I

1. INTRODUÇÃO GERAL

A biofortificação agronômica tem se consolidado como uma estratégia eficaz para melhorar a qualidade nutricional dos alimentos, especialmente no caso de micronutrientes essenciais à saúde humana, como o Selênio (Se) (HOSSAIN et al., 2021). Além de contribuir para a nutrição, esse elemento pode desempenhar um papel fundamental na tolerância ao estresse hídrico, auxiliando as plantas a resistirem à seca e mitigar as perdas na produção agrícola.

No cultivo do gergelim (*Sesamum indicum* L.), um alimento altamente energético e rico em compostos bioativos (FREITAS et al., 2016), a aplicação de Se pode não apenas enriquecer os grãos com esse elemento, mas também fortalecer os mecanismos de defesa da planta contra os impactos da baixa disponibilidade hídrica (DOS SANTOS et al., 2024).

O Se melhora a eficiência das trocas gasosas com a regulação estomática, minimizando a perda de água por transpiração e aumentando a eficiência fotossintética, permitindo que a planta continue seu desenvolvimento mesmo em condições adversas (AKHTER ANSARI et al., 2019). O déficit hídrico representa um dos principais desafios agrícolas, principalmente em regiões que possuem condições de baixa precipitação associadas a altas temperaturas, especialmente em regiões tropicais afetadas por fenômenos como o El Niño, que reduzem as chuvas em áreas produtoras, onde a escassez de água compromete o crescimento das plantas e reduz significativamente a produtividade (THUC et al., 2021).

No gergelim, em que a principal forma de consumo do gergelim é in natura, a biofortificação com Se pode melhorar aproveitamento dos recursos naturais disponíveis, contribuir diretamente para a segurança alimentar, ao oferecer um alimento mais nutritivo, enriquecido com um micronutriente essencial à saúde humana (REIS et al., 2020).

A deficiência de Se na dieta pode levar à chamada fome oculta, uma condição caracterizada pela insuficiência de micronutrientes essenciais, mesmo quando há disponibilidade calórica adequada. Adicionar Se no sistema possibilita a produção de grãos com maior valor nutricional, favorecendo o consumo de alimentos funcionais e prevenindo doenças relacionadas ao estresse oxidativo, sobretudo na população de países pobres e em desenvolvimento.

Dessa forma, a biofortificação agronômica com Se na cultura do gergelim pode ir além de atender as necessidades nutricionais humanas, pois tem papel duplo na segurança alimentar, podendo mitigar os danos da produção mundial frente aos eventos extremos das mudanças climáticas e reduzir a fome oculta com alimentos de alto valor nutricional. Com isso, o objetivo desse trabalho foi avaliar como a adição de Se ao solo pode melhorar a qualidade nutricional do grão, e mitigar os efeitos do déficit hídrico reduzindo os danos na produção.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. A cultura do gergelim

O gergelim (*Sesamum indicum* L.) é uma planta herbácea, pertencente à família das Pedaliaceae, originária da África, onde possui a maior parte das espécies silvestres. No entanto, a maioria das variedades cultivadas se desenvolveu e se disseminou em países do continente asiático (DESALE; JEMA; BOSENA, 2019).

Sua altura pode variar de 50 a 250 cm de altura, a depender da variedade e das condições ambientais. O sistema radicular é pivotante, o que garante a penetração eficiente no solo absorvendo a água e nutrientes de forma precisa. As folhas são alternadas, com formas ovais no terço médio inferior e lanceoladas na parte superior da planta e o hábito de crescimento pode ser determinado ou indeterminado (Figura 1) (TRIPATHY; KAR; SAHU, 2019).

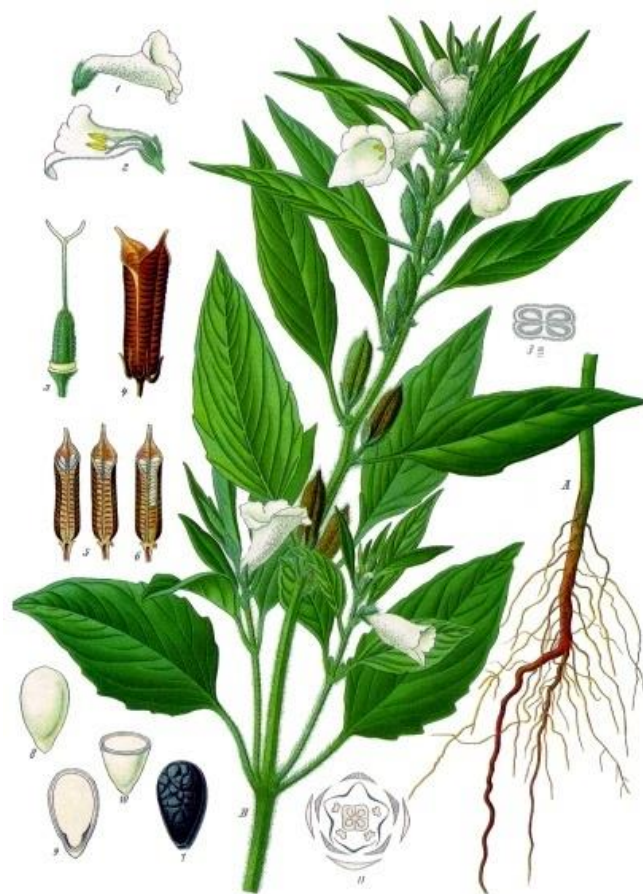


Figura 1. Ilustração de uma planta de gergelim, suas folhas, flores, cápsulas, grãos e raiz. Autor: Franz Eugen Köhler.

Suas flores surgem nas axilas das folhas e são caracterizadas por uma corola tubular, que pode ser branca, rosa, roxa ou vermelha. É uma planta autógama, mas

pode acontecer polinização cruzada, principalmente por abelhas, chegando a 68%. Os frutos do gergelim são cápsulas alongadas, pilosas ou glabras e semideiscentes, na grande maioria dos casos. Cada cápsula contém sementes pequenas, ovais e achatadas, que podem ter cores variadas, como branco, preto, vermelho e marrom (TRIPATHY; KAR; SAHU, 2019).

O ciclo de vida do gergelim é anual, com variações no tempo de maturação de acordo com a cultivar e as condições climáticas da região em que está sendo cultivada. A intensidade e qualidade da luminosidade também é um ponto chave para seu crescimento, para realizar a fotossíntese de forma eficiente, ele necessita de pelo menos 10 horas de luz (WEI et al., 2022).

A altitude desempenha um papel importante no cultivo do gergelim, pois nos locais com altitudes inferiores a 500 metros, as condições de temperatura e pluviosidade possuem padrões mais estáveis, que beneficia beneficiando o desenvolvimento da planta. Assim a baixa altitude combinada com temperaturas relativamente altas, entre 25 e 30 °C, e pluviosidade moderada, favorecem a produção de sementes de qualidade superior, essenciais para o mercado alimentício e para a extração de óleo (FREITAS et al., 2016).

A quantidade de água necessária para seu desenvolvimento é menor, 400 a 650 mm, porém, o período de floração também é considerado crítico, sendo importante o manejo hídrico adequado para o funcionamento do metabolismo vegetal (FANG et al., 2024). É considerada uma cultura rústica, porque se adapta facilmente a diversos tipos de solos, mas é possível observar melhor desempenho em solos de textura média e bem drenados e pH entre 5,5 e 6,5 (ARRIEL; BELTRÃO, 2023).

Na adubação da cultura os nutrientes N, P, K recebem mais atenção, sendo que N e K são os mais acumulados pela cultura, e P em virtude das interações com o solo. Em média, para produzir uma tonelada de sementes, o gergelim precisa absorver 50, 6,11 e 49,8 kg de N, P e K, respectivamente. A exportação de nutrientes muda conforme a cultivar, a produtividade e a fertilidade do solo, podendo variar de 30 a 60% para cada nutriente (SANTOS; HAAG; MINAM, 1982).

Os teores de Ca, Mg e S na parte aérea foi avaliado na cultivar BRS Anahí e os resultados foram 18,77; 8,65 e 5,06 g kg⁻¹, respectivamente. Os teores de micronutrientes também foram quantificados, 80,86; 45,06; 402,12; 82,32; 102,09 para B, Cu, Fe, Mn e Zn mg kg⁻¹, respectivamente. Nesse caso, a produção de grãos foi

igual a 4,17 g por planta. Os autores relatam que ao utilizar bactérias promotoras de crescimento, foi possível verificar aumento de 18% na produção (LIMA, 2023).

Os teores de nutrientes nas plantas de gergelim variaram conforme foram adotando técnicas e manejos para aumentar a produtividade. Diversos trabalhos mostram que além disso, um olhar cuidadoso sobre a qualidade nutricional e a sustentabilidade nos sistemas de plantio tem sido mais enfatizado (ZHOU et al., 2020). Por um lado, há maior exigência por parte dos consumidores, por outro, o reflexo das mudanças climáticas tem tornado o produtor mais cuidadoso com o meio ambiente (FREITAS et al., 2016).

No âmbito da produção, os maiores produtores mundiais, em 2023, foram Sudão com 1,2 milhão de toneladas, seguido por Índia, Myanmar, China e Nigéria com 788, 760, 700 e 450 mil toneladas, respectivamente (FAOSTAT, 2023). No Brasil, o gergelim foi introduzido por navegantes portugueses no século XVI, mas a sua produção começou ganhar destaque a nível nacional somente nos últimos 60 anos (ARRIEL; BELTRÃO, 2023).

Apesar de ainda ser considerado um pequeno produtor de gergelim, quando se compara aos citados anteriormente, o Brasil tem apresentado um crescimento significativo na produção desse grão. Na safra de 2023/2024 houve um aumento de 780% na produção e 1.245% para área de cultivo, em relação à safra 2018/2019 (Figura 2). Ainda, pode-se destacar o aumento de área foi tão expressivo quanto os ganhos em produção, que é reflexo dos investimentos em pesquisas nessa cultura.

Regiões como Mato Grosso, nos municípios de Água Boa, Nova Xavantina e, de forma notável, em Canarana se destacam na produção nacional. Este crescimento também é observado em outros estados, incluindo Pará, Maranhão, Bahia, Tocantins e Goiás, embora em menor escala (CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2025).

O aumento na produção de gergelim pode ser ainda mais expressivo devido aos acordos firmados pelo governo federal com o maior consumidor de gergelim do mundo, a China, que é responsável por 36% das importações mundiais. Ao todo, desde a assinatura do acordo, 21 empresas brasileiras já foram habilitadas para realizar as exportações para o país asiático, o que gera expectativas para maior volume de produção de gergelim nos próximos anos (MAPA, 2025).

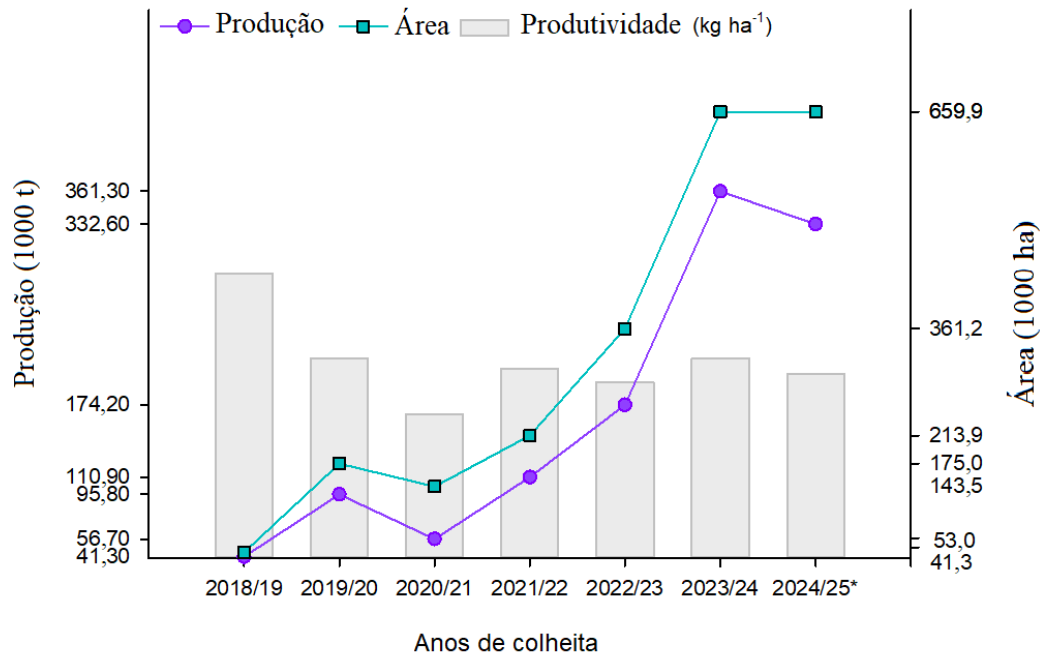


Figura 2. Produção, área e produtividade de gergelim no Brasil nos últimos cinco anos. CONAB, 2025.

A partir disso, emprego dessa cultura é principalmente durante a safrinha, nos grandes cultivos, principalmente com a flutuação da pluviosidade, pois garante menores riscos ao produtor com a maior frequência dos eventos extremos, já que o investimento em insumos agrícolas é menor quando comparado ao do milho. O custo de produção para implantar 1 hectare de gergelim está da faixa de mil a mil e quinhentos reais, já o do milho, fica entre quatro e cinco mil reais (CINEL, 2024).

Outro motivo relevante para aumentar o interesse dos produtores no gergelim foi a busca por alternativas para substituir espécies produtoras de grãos já consolidados nos sistemas de plantio, principalmente, diante do aumento nos preços dos fertilizantes causados devido a conflitos entre países responsáveis por grandes produções e importações de fertilizantes.

Ainda, após a pandemia da COVID-19, o interesse pelo consumo de alimentos mais saudáveis e que conferem benefícios à saúde, aumentou de forma expressiva. Os grãos de gergelim são alimentos que possuem alta qualidade nutricional, contém quantidade considerável de proteínas, carboidratos, minerais essenciais, uma grande quantidade de metionina e triptofano, fibras, bem como metabólitos secundários, como lignanas, saponinas, flavonoides e compostos fenólicos. Além disso, as

sementes são uma boa fonte de cálcio, fósforo e ferro e são ricas em vitamina B, E e pequena quantidade de oligoelementos (FREITAS et al., 2018; LYON, 1972).

Além disso, os grãos tem elevado teor de óleo (45-55%) que é bastante valorizado na indústria alimentícia, devido às suas características como estabilidade à oxidação, com alto ponto de fumaça (170 – 210 °C) e presença de antioxidantes naturais (AHMAD et al., 2023). É rico em ácidos graxos insaturados como ácido oleico (ômega 9) e linoleico (ômega 6), cerca de 40 a 50 %, respectivamente, que contribuem para a saúde do coração (FREITAS et al., 2018).

A versatilidade das sementes e do óleo é muito valorizada em outras indústrias como produto para enriquecimento da ração animal; produção de cosméticos como sabonetes, hidratante, produtos para cabelo e pele; fabricação de suplementos nutricionais e medicamentos devido às suas propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias (LANGYAN et al., 2022). Também tem lugar na indústria química, com a fabricação de solventes ecologicamente corretos, produção de biodiesel, lubrificantes naturais e bioprodutos. Estima-se que em torno de 70% da produção de gergelim é destinada a produção de óleo e farinha, mas há uma perspectiva de que tenha alteração nesse padrão com o crescente interesse pelo consumo do óleo de gergelim na alimentação humana (TRONCOSO-PONCE et al., 2011).

Embora diversas características despertam o interesse, algumas limitações são entraves para adoção da cultura pelo produtor, dentre elas é a falta de algumas tecnologias para o cultivo mecanizado, sobretudo na colheita, que restringe o cultivo por pequenos produtores e em áreas menores, pois é demonstrado em torno de 50% da produção é perdida na colheita (DESALE; JEMA; BOSENA, 2019).

Dessa forma, muitas pesquisas para maximizar a produtividade e minimizar as perdas são de grande interesse. Avanços no campo das engenharias estão ganhando destaque, como maquinários apropriados para o plantio e colheita, melhoramento genético que induzem maiores resistências/tolerância a condições bióticas e abióticas, além de produtos que aumentam a fixação das sementes nas cápsulas ao final do ciclo da cultura (TEKLU; SHIMELIS; ABADY, 2022; TRIPATHY; KAR; SAHU, 2019).

2.2. Selênio e sua importância

Estudos relacionados à segurança alimentar têm ganhado destaque no âmbito nacional e internacional, principalmente com relação aos benefícios ligados à saúde do ser humano e às melhorias na sua nutrição básica. Nesse sentido, o elemento

selênio (Se) além de ser um elemento traço, essencial para o ser humano e os animais devido ao seu valor nutricional, é fonte de estudos de interesse em vários países por ser relevante na nutrição e alimentação. Pois consideram-se suas propriedades anticancerígenas e antioxidantes, principalmente dentro dos programas de biofortificação em diferentes tipos de alimentos e culturas (LARA et al., 2019; REIS et al., 2020; WHITE, 2015).

Os problemas de saúde humana e animal relacionados à deficiência de Se podem surgir em virtude da distribuição desse elemento no solo e sua absorção moderada pelas culturas. Isso é evidenciado em diversas partes do mundo e torna-se um problema de caráter nutricional associado a uma dieta com ingestão de Se abaixo da adequada, atingindo cerca de 15% da população mundial (BAILEY; WEST JR.; BLACK, 2015).

Encontrado em baixas concentrações no solo, principalmente nos interiores distantes do litoral, o Se em suas formas disponíveis para as plantas, podem diminuir a ingestão dietética desse elemento. Por isso, deve-se atentar para a importância de aumentar a biodisponibilidade de Se e elevar o teor nas partes comestíveis das plantas cultivadas em áreas deficientes de Se (SOUZA et al., 2014). Portanto, as estratégias de manejo destinadas a minimizar a deficiência de Se e os distúrbios relacionados à dieta devem se concentrar no estabelecimento de uma conexão entre os produtos alimentares agrícolas, o teor de Se e a disponibilidade no solo (WINKEL et al., 2015).

Nesse sentido, em diversos países, como China, Finlândia e Reino Unido, estratégias para a ingestão de Se vêm sendo estudadas e, entre elas, destaca-se a biofortificação de plantas, que é definida como o processo de aumento da concentração biodisponível de elementos essenciais e benéficos aos seres humanos e animais em partes comestíveis das plantas por meio da intervenção agrícola ou seleção genética (WHITE, 2015).

A biofortificação em plantas por meio da fertilização com Se, seja via foliar ou aplicação direta no solo, apresenta potencial para fornecer benefícios contínuos, ano após ano, a um custo menor e mais eficiente que o uso de suplementos alimentares e da fortificação de produtos pós-colheita nas indústrias (BORGHI et al., 2025; GOMES et al., 2025; LARA et al., 2019; MATEUS et al., 2021).

As plantas apresentam capacidades diferenciadas de absorção e acúmulo de Se, sendo possível absorver esse elemento principalmente nas formas de selenato

(SeO_4^{2-}) e selenito (SeO_3^{2-}), embora possa também ser absorvido como selênio elementar (Se_0), seleneto (Se^{2-}) e formas orgânicas de Se, como selênio quelatado com aminoácido (AHMAD et al., 2016; DINH et al., 2019; DUCSAY et al., 2016; HOSSAIN et al., 2021).

O Se, ao ser absorvido pelas plantas na forma de selenato, apresenta propriedades químicas semelhantes às do enxofre (S), sendo compartilhadas as mesmas vias metabólicas. A presença de compostos isólogos nas plantas indica que o Se e S competem em processos biológicos que podem afetar a absorção, translocação e assimilação nos processos de crescimento das plantas (SORS; ELLIS; SALT, 2005). O Se na forma de selenato é prontamente absorvido pelas plantas através dos transportadores de sulfato e devido às suas semelhanças químicas, Se e o S, competem pelos mesmos transportadores, sendo a absorção de Se geralmente limitada por altos teores de S (CHAUHAN et al., 2019).

Apesar de ainda não ser considerado um nutriente para as plantas, o Se têm sido classificado como elemento benéfico, contribuindo para o crescimento e qualidade das plantas devido aos seus efeitos antioxidantes (WHITE, 2015). Os teores de Se nas plantas, animais e seres humanos, numa determinada região, estão diretamente relacionados com o conteúdo desse elemento no solo, que por sua vez está relacionado com a pedologia, gênese e localização das áreas de cultivo, tendo as plantas um papel essencial na transferência do Se do solo para a cadeia alimentar (LESSA et al., 2016).

A adição de Se à mistura de fertilizantes, como maneira de suprir sua necessidade em solos com baixos teores deste elemento e incrementar sua concentração nas plantas, é relativamente recente. Uma das primeiras tentativas foi em milho e aveia, que foi aplicado selenito de sódio nas doses de 2,24 e 4,48 kg ha⁻¹ em campos de milho, aveia e forragem, que apresentaram concentrações de Se no tecido vegetal acima de 0,1 mg kg⁻¹, sendo o suficiente para proteger os animais de doenças causadas pela deficiência de Se em teores que não foram considerados tóxicos (CARY; ALLAWAY, 1973).

Em decorrência do aumento nos casos de câncer e problemas cardíacos na população, em 1984, o Ministério de Agricultura e Florestas da Finlândia iniciou a suplementação de plantas com fertilizantes minerais contendo Se na fonte de selenato de sódio. A princípio, a suplementação de Se foi constituída de 16 mg kg⁻¹ para cereais e hortaliças e de 6 mg kg⁻¹ para pastagens. Após diversas pesquisas, foi estipulado

em 10 mg kg^{-1} o teor de Se em fertilizantes (KAUR et al., 2014). Essa suplementação aumentou os teores de Se no solo, e em consequência incrementou o nível desse elemento nos alimentos, ficando dentro dos limites considerados seguros e adequados para o consumo humano, 55 a $400 \mu\text{g dia}^{-1}$, além de incrementar a produção das culturas (HARTIKAINEN, 2005).

No Brasil, trabalhos dessa natureza estão em constante crescimento, pois existem fortes evidências de baixo consumo de Se pela população brasileira, principalmente nos grupos de baixo poder aquisitivo, os quais não consomem produtos de origem animal com frequência, podendo ocorrer deficiência de Se no organismo (REIS et al., 2018, 2020; SILVA et al., 2020).

A legislação brasileira não permitia a adição de Se em fertilizantes para fins comerciais. No entanto, recentemente, com o surgimento de pesquisas nacionais sobre o Se na agricultura, essa prática passou a ser liberada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) através da instrução normativa Nº 39 de 8 de agosto de 2018 (MAPA, 2018) onde estabelece os valores mínimos que devem conter do elemento nos fertilizantes.

Muitos trabalhos têm demonstrado a eficácia da biofortificação com Se no acúmulo deste elemento em diferentes culturas alimentares (ROS et al., 2016). É notável que grande parte dos estudos sobre a biofortificação com Se envolvam, cereais, grãos e hortaliças, principalmente devido ao fato de muitas delas constituírem a base da alimentação da população de diversos países.

A maior parte dos elementos comprovadamente essenciais ao homem e aos animais também exercem funções importantes no desenvolvimento vegetal e, em muitos casos, seus mecanismos de ação são similares. Nesse sentido, cita-se, por exemplo, a função antioxidante do Se na eliminação de espécies reativas de oxigênio (ERO's) (ANDRADE et al., 2018; DOS SANTOS et al., 2024), que ocorre tanto na planta quanto no organismo humano. Em condições normais, a produção de ERO's em células de plantas é mantida em níveis baixos. No entanto, em condições de estresse os níveis de ERO's são aumentados, afetando os processos metabólicos e, por fim, o crescimento e produção das plantas (AHMAD et al., 2023).

Vários estudos têm demonstrado que, em baixas concentrações, o Se exerce efeito benéfico sobre o crescimento das plantas e a tolerância a estresses ambientais (KADKHODAIE et al., 2014a, 2014b). Esses efeitos positivos, provavelmente, estão relacionados com o aumento da capacidade antioxidante, tanto em diminuir a

peroxidação de lipídios quanto em aumentar a atividade de enzimas antioxidantes como catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD) e ascorbato peroxidase (APX) (GILL; TUTEJA, 2010).

Além de aumentar também compostos não enzimáticos como os pigmentos fotossintéticos, prolina, açúcares de diversos tipos, aminoácidos, proteínas, compostos fenólicos, dentre outros. Todos com funções específicas mas que tem papel semelhante, ajudar na defesa celular contra os estresses oxidativos (HASANUZZAMAN et al., 2020). No entanto, em elevadas concentrações, o Se tem desencadeado efeitos negativos nas plantas, com redução no crescimento e intensificação dos processos peroxidativos, ocasionando superprodução de ERO's (DINH et al., 2019).

As plantas possuem capacidades diferentes em acumular e tolerar Se, podendo ser classificadas como não-acumuladoras, acumuladoras e hiperacumuladoras (WHITE; BROADLEY, 2009). As plantas hiperacumuladoras de Se são nativas de solos seleníferos e acumulam Se em níveis 100 vezes maiores do que as plantas não-acumuladoras, sendo capazes de acumular teores superiores a 2.000 mg kg^{-1} , como é o caso das plantas dos gêneros *Astragalus*, *Stanleya*, *Morinda*, *Neptunia*, *Oonopsis*, *Xylorhiza* e *Cardamine* (WHITE, 2015).

As plantas acumuladoras crescem em solos com teores de Se variando de baixo a médio e podem acumular até 1.000 mg kg^{-1} de selênio na matéria seca. Exemplos de plantas desse grupo são a mostarda indiana (*Brassica juncea*) e canola (*B. napus*). A maior parte das culturas agrícolas apresentam baixa tolerância a altas concentrações de Se, apresentando, geralmente, menos de 25 mg kg^{-1} de Se na massa seca e são classificadas como não acumuladoras (CHAUHAN et al., 2019).

2.3. Efeitos do déficit hídrico em plantas

Dentre os inúmeros fatores necessários para crescimento e desenvolvimento vegetal, como radiação, temperatura, CO_2 , macro e micronutrientes, a água é considerada como um dos principais fatores exigido por diferentes espécies de plantas (ZAIN et al., 2014).

Ela participa em todos os processos bioquímicos e fisiológicos, sendo o principal constituinte vegetal, estando presente em cerca de 90% do seu peso total, agindo como solvente no transporte de minerais e compostos orgânicos e gases, além

de atuar como regulador térmico, mantendo e distribuindo o calor na planta (ANDRADE et al., 2018; TAIZ et al., 2017).

Em casos onde ocorre déficit hídrico, que a quantidade de água transpirada pelas folhas, através dos estômatos, é maior que a capacidade da planta em absorver água do solo, acontece o que é chamado de estresse por restrição hídrica (AHMAD et al., 2016). Esse desequilíbrio entre a perda e absorção de água pelas plantas ocorre quando o potencial hídrico do solo é inferior ao potencial hídrico das raízes, ou seja, há baixa disponibilidade de água para as plantas (TAIZ; ZEIGER, 2017).

Uma das primeiras alterações causadas pelo déficit hídrico em plantas é a redução da condutância estomática (g_s) (ANDRADE et al., 2018), primeiramente devido a redução do turgor das células guarda, que resulta no aumento da biossíntese de ácido abscísico (ABA) (HASANUZZAMAN et al., 2020; TARDIEU et al., 2014).

Produzido no sistema radicular, o ABA será transportado via xilema para a parte aérea onde seu acúmulo irá atuar como sinalizador, promovendo o efluxo de íons K^+ das células-guarda, o que ocasiona a perda da pressão de turgor e assim, ocorre o fechamento dos estômatos (MAHAJAN; TUTEJA, 2005), e a redução da transpiração (AHMAD et al., 2023).

Após a recuperação da disponibilidade hídrica, o balanço de carbono vai depender do quanto foi reduzido da taxa fotossintética por consequência do estresse e da capacidade da planta em se reestabelecer após a reidratação. Pois, com a menor condutância estomática, em virtude do estresse hídrico, há redução da assimilação líquida de CO_2 e, conseqüentemente, comprometimento na atividade da enzima Rubisco por falta de substrato (CO_2) gerando baixa atividade do ciclo de Calvin-Benson (TAIZ et al., 2017).

A falta de CO_2 como substrato para carboxilação, pela Rubisco faz com que a atividade oxigenase supere a carboxilase, processo denominado de fotorrespiração, o que provoca a perda parcial do carbono fixado pelo ciclo de Calvin-Benson, conseqüentemente a redução na produção de biomassa pelas plantas (TAIZ et al., 2017).

Com a diminuição da assimilação líquida de CO_2 em condições de déficit hídrico, e a intensidade de radiação sob a folha permanecendo alta, ocorre o acúmulo de poder redutor (NADPH) nos cloroplastos advindo da etapa fotoquímica pelo fotossistema I (PSI) devido ao menor consumo pela etapa bioquímica e causa alteração no estado redox da planta (TAIZ et al., 2017).

Parte desse excesso de poder redutor nos cloroplastos, pode ser usado para reduzir a molécula de O_2 , levando a formação de ERO's, como o ânion superóxido, oxigênio singlete e o radical hidroxila que são consequência inevitável do metabolismo aeróbico. Em baixas concentrações, as ERO's atuam como importantes moléculas sinalizadoras do metabolismo, produzidas nos cloroplastos, na região da mitocôndria e peroxissomos (DAS; ROYCHOUDHURY, 2014).

Porém, quando há um desbalanço entre a produção das ERO's e a eliminação pelo sistema antioxidante enzimático e não-enzimático ocorre o estresse oxidativo, causando danos oxidativos em biomoléculas como nucleotídeos, proteínas e lipídeos (SHARMA et al., 2012). Um dos possíveis indicadores do estresse oxidativo é o conteúdo de prolina, peróxido de hidrogênio e malondeialdeído (MDA), o último produto da peroxidação de lipídeos nas membranas (VELIKOVA; YORDANOV; EDREVA, 2000).

Além disso, alterações morfofisiológicas e bioquímicas podem ocorrer na planta em consequência do déficit hídrico, diferindo de uma espécie para outra. Estas alterações incluem redução na área foliar, fechamento estomático, redução do potencial hídrico, inibição fotossintética, abscisão foliar, desestabilização de membranas e proteínas, acúmulo de ERO's e crescimento do sistema radicular (AKHTER ANSARI et al., 2019; VEGA-RAVELLO et al., 2023; YOUSEFZADEH NAJAFABADI; EHSANZADEH, 2017).

Bioquimicamente, as plantas alteram o metabolismo de várias maneiras, incluindo a produção de compostos osmorreguladores, tais como prolina, ABA e açúcares. Além de alteração nos conteúdos de clorofila a e b, que em condição de estresse, a degradação da clorofila a pode ser mais acentuada (KADKHODAIE et al., 2014a; MAFAKHERI et al., 2010; ZHAO et al., 2017).

Por meio destes mecanismos, as plantas conseguem diminuir o potencial hídrico sem que haja redução da turgidez das células vegetais, permitindo a continuidade de processos fisiológicos essenciais para o seu crescimento e desenvolvimento (TAIZ e ZEIGER, 2017).

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA BRASILEIRA DE PROMOÇÃO DE EXPORTAÇÕES E INVESTIMENTOS (APEXBRASIL). **Estudo de mercado do gergelim**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/relacoes-internacionais/adidos-agricolas/india/EstudoAcessoMercadoGergelimIndia2023.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2025.
- AHMAD, I. et al. Phytomediated Selenium Nanoparticles Improved Physio-morphological, Antioxidant, and Oil Bioactive Compounds of Sesame under Induced Biotic Stress. **ACS Omega**, v. 8, n. 3, p. 3354–3366, 24 jan. 2023.
- AHMAD, R. et al. Selenium (Se) improves drought tolerance in crop plants – a myth or fact? **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 2, p. 372–380, 30 jan. 2016.
- AKHTER ANSARI, W. et al. Influence of Drought Stress on Morphological, Physiological and Biochemical Attributes of Plants: A Review. **Biosciences, Biotechnology Research Asia**, v. 16, n. 04, p. 697–709, 31 dez. 2019.
- AMINI, M. et al. Effects of sesame dehulling on physicochemical and sensorial properties of its oil. **Food Science & Nutrition**, v. 11, n. 10, p. 6596–6603, out. 2023.
- ANDRADE, F. R. et al. Selenium protects rice plants from water deficit stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 164, p. 562–570, nov. 2018.
- ARRIEL, N. H. C.; BELTRÃO, N. E. DE M. **Cultivo do gergelim**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, , 2023. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1155372/1/Cultivo-do-Gergelim.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2025
- BAILEY, R. L.; WEST JR., K. P.; BLACK, R. E. The Epidemiology of Global Micronutrient Deficiencies. **Annals of Nutrition and Metabolism**, v. 66, n. Suppl. 2, p. 22–33, 2015.
- BORGHI, E. J. A. et al. Simultaneous Biofortification with Selenium and Zinc: Ionic Interaction and its Effects on Rice Production. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, p. 1–15, 6 abr. 2025.
- CABRAL GOUVEIA, G. C. et al. Selenium toxicity stress-induced phenotypical, biochemical and physiological responses in rice plants: Characterization of symptoms and plant metabolic adjustment. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 202, p. 110916, out. 2020.
- CARY, E. E.; ALLAWAY, W. H. Selenium Content of Field Crops Grown on Selenite-Treated Soils. **Agronomy Journal**, v. 65, n. 6, p. 922–925, nov. 1973.
- CHAUHAN, R. et al. Understanding selenium metabolism in plants and its role as a beneficial element. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 21, p. 1937–1958, 2 nov. 2019.

CINEL, V. **Crescimento do Gergelim Brasileiro: O Milho Poderia Ser a Resposta? Capacitando Cadeias de Suprimentos por meio da Tecnologia**, 2024. Disponível em: <<https://www.czapp.com/pt/analyst-insights/crescimento-do-gergelim-brasileiro-o-milho-poderia-ser-a-resposta/#:~:text=No%20Brasil%2C%20o%20gergelim%20ganhou,%C3%A1rea%20plantada%20e%20na%20produtividade.>>. Acesso em: 13 abr. 2025

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Boletim safra de graos**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>.

DAS, K.; ROYCHOUDHURY, A. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. **Frontiers in Environmental Science**, v. 2, 2 dez. 2014.

DESALE, G.; JEMA, H.; BOSENA, T. Sesame post-harvest loss from small-scale producers in Kafta Humera District, Ethiopia. **Journal of Development and Agricultural Economics**, v. 11, n. 2, p. 33–42, 28 fev. 2019.

DINH, Q. T. et al. Bioavailability of selenium in soil-plant system and a regulatory approach. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 6, p. 443–517, 19 mar. 2019.

DJANAGUIRAMAN, M.; PRASAD, P. V. V.; SEPPANEN, M. Selenium protects sorghum leaves from oxidative damage under high temperature stress by enhancing antioxidant defense system. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 999–1007, dez. 2010.

DOS SANTOS, L. C. et al. Enhancing Wheat Resilience to Water Deficit through Selenium Biofortification: Perspectives on Physiological, Biochemical and Nutritional Responses. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 24, n. 4, p. 7418–7435, dez. 2024.

DUCSAY, L. et al. Possibility of selenium biofortification of winter wheat grain. **Plant, Soil and Environment**, v. 62, n. 8, p. 379–383, 31 ago. 2016.

FANG, S. et al. Sesame (*Sesamum indicum* L.) growth properties and yield attributes are associated with potassium level in response to drought stress. **Journal of Plant Nutrition**, v. 47, n. 9, p. 1364–1377, 27 maio 2024.

FAO, F. AND A. O.-. **Sesame seed - production**. , 2022. Disponível em: <<https://www.tridge.com/intelligences/sesame-seed/production>>. Acesso em: 17 mar. 2025

FREITAS, M. N. DE et al. Crescimento e produtividade de gergelim em Neossolo Flúvico em função de adubação orgânica e mineral. **Revista Ceres**, v. 63, n. 4, p. 568–575, ago. 2016.

FREITAS, M. N. DE et al. **Composição Química de Três Variedades de Gergelim**. Embrapa Agroindústria Tropical, , 2018. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1091165/1/BPD18009.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2025

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 909–930, dez. 2010.

GOMES, F. T. D. L. et al. Agronomic Biofortification with Selenium and Zinc in Tomato Plants (*Solanum lycopersicum* L.) and their Effects on Nutrient Content and Crop Production. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 13 fev. 2025.

HARTIKAINEN, H. Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 18, n. 4, p. 309–318, jun. 2005.

HASANUZZAMAN, M. et al. Regulation of ROS Metabolism in Plants under Environmental Stress: A Review of Recent Experimental Evidence. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 22, p. 8695, 18 nov. 2020.

HOSSAIN, A. et al. Selenium Biofortification: Roles, Mechanisms, Responses and Prospects. **Molecules**, v. 26, n. 4, p. 881, 7 fev. 2021.

KADKHODAIE, A. et al. Selecting Sesame Genotypes for Drought Tolerance Based on Some Physiochemical Traits. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 1, p. 111–118, jan. 2014a.

KADKHODAIE, A. et al. Changes in some anti-oxidative enzymes and physiological indices among sesame genotypes (*Sesamum indicum* L.) in response to soil water deficits under field conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 36, n. 3, p. 641–650, mar. 2014b.

KAUR, N. et al. Selenium in agriculture: a nutrient or contaminant for crops? **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 60, n. 12, p. 1593–1624, 2 dez. 2014.

LANGYAN, S. et al. Food and nutraceutical functions of sesame oil: An underutilized crop for nutritional and health benefits. **Food Chemistry**, v. 389, p. 132990, set. 2022.

LARA, T. S. et al. Selenium biofortification of wheat grain via foliar application and its effect on plant metabolism. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 81, p. 10–18, ago. 2019.

LESSA, J. H. L. et al. Adsorption-desorption reactions of selenium (VI) in tropical cultivated and uncultivated soils under Cerrado biome. **Chemosphere**, v. 164, p. 271–277, dez. 2016.

LIMA, B. H. D. **NUTRIÇÃO, FISIOLOGIA E PRODUÇÃO DE CULTIVARES DE GERGELIM INOCULADOS COM MICRORGANISMOS PROMOTORES DE CRESCIMENTO DE PLANTAS**. Ilha Solteira, São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 2023.

LYON, C. K. Sesame: Current knowledge of composition and use. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 49, n. 4, p. 245–249, abr. 1972.

MAFAKHERI, A. et al. Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll contents in three chickpea cultivars. v. 4, p. 580–585, 2010.

MAHAJAN, S.; TUTEJA, N. Cold, salinity and drought stresses: An overview. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 444, n. 2, p. 139–158, dez. 2005.

MAPA, M. DA A. E P. **China habilita 21 empresas brasileiras para exportação de gergelim. Governo Federal do Brasil**, 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/china-habilita-21-empresas-brasileiras-para-exportacao-de-gergelim>>. Acesso em: 14 abr. 2025

MAPA, M. DA A., Pecuária e Abastecimento-. **INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 39, DE 8 DE AGOSTO DE 2018.**, 2018. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-39-2018-fert-minerais-versao-publicada-dou-10-8-2018.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2025

MATEUS, M. P. D. B. et al. Selenium biofortification enhances ROS scavenge system increasing yield of coffee plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 209, p. 111772, fev. 2021.

REIS, H. P. G. et al. Agronomic biofortification of upland rice with selenium and nitrogen and its relation to grain quality. **Journal of Cereal Science**, v. 79, p. 508–515, jan. 2018.

REIS, H. P. G. et al. Agronomic biofortification with selenium impacts storage proteins in grains of upland rice. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 100, n. 5, p. 1990–1997, 30 mar. 2020.

ROS, G. H. et al. Selenium fertilization strategies for bio-fortification of food: an agro-ecosystem approach. **Plant and Soil**, v. 404, n. 1–2, p. 99–112, jul. 2016.

SANTOS, R. A. D.; HAAG, H. P.; MINAM, K. Nutrição mineral do gergelim (*Sesamum indicum* L.): I. Concentração e acúmulo de macronutrientes em condições de campo. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 39, p. 89, 1982.

SHARMA, P. et al. Reactive Oxygen Species, Oxidative Damage, and Antioxidative Defense Mechanism in Plants under Stressful Conditions. **Journal of Botany**, v. 2012, p. 1–26, 24 abr. 2012.

SILVA, V. M. et al. Selenate and selenite affect photosynthetic pigments and ROS scavenging through distinct mechanisms in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) walp) plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 201, p. 110777, set. 2020.

SORS, T. G.; ELLIS, D. R.; SALT, D. E. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants. **Photosynthesis Research**, v. 86, n. 3, p. 373–389, dez. 2005.

SOUZA, G. A. et al. Genotypic variation of zinc and selenium concentration in grains of Brazilian wheat lines. **Plant Science**, v. 224, p. 27–35, jul. 2014.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. [s.l.] Artmed, 2017.

TARDIEU, F. et al. Genetic and Physiological Controls of Growth under Water Deficit. **Plant Physiology**, v. 164, n. 4, p. 1628–1635, 8 abr. 2014.

TEKLU, D. H.; SHIMELIS, H.; ABADY, S. Genetic Improvement in Sesame (*Sesamum indicum* L.): Progress and Outlook: A Review. **Agronomy**, v. 12, n. 9, p. 2144, 9 set. 2022.

TRIPATHY, S. K.; KAR, J.; SAHU, D. Advances in Sesame (*Sesamum indicum* L.) Breeding. Em: AL-KHAYRI, J. M.; JAIN, S. M.; JOHNSON, D. V. (Eds.). **Advances in Plant Breeding Strategies: Industrial and Food Crops**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 577–635.

TRONCOSO-PONCE, M. A. et al. Comparative deep transcriptional profiling of four developing oilseeds. **The Plant Journal**, v. 68, n. 6, p. 1014–1027, dez. 2011.

VEGA-RAVELLO, R. et al. Soil Selenium Addition for Producing Se-Rich Quinoa and Alleviating Water Deficit on the Peruvian Coast. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 1, p. 238–250, mar. 2023.

VELIKOVA, V.; YORDANOV, I.; EDREVA, A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants. **Plant Science**, v. 151, n. 1, p. 59–66, fev. 2000.

WEI, P. et al. Sesame (*Sesamum indicum* L.): A Comprehensive Review of Nutritional Value, Phytochemical Composition, Health Benefits, Development of Food, and Industrial Applications. **Nutrients**, v. 14, n. 19, p. 4079, 30 set. 2022.

WHITE, P. J. Selenium accumulation by plants. **Annals of Botany**, p. mcv180, 29 dez. 2015.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. **New Phytologist**, v. 182, n. 1, p. 49–84, abr. 2009.

YOUSEFZADEH NAJAFABADI, M.; EHSANZADEH, P. Photosynthetic and antioxidative upregulation in drought-stressed sesame (*Sesamum indicum* L.) subjected to foliar-applied salicylic acid. **Photosynthetica**, v. 55, n. 4, p. 611–622, 1 dez. 2017.

ZAIN, N. A. M. et al. Impact of cyclic water stress on growth, physiological responses and yield of rice (*Oryza sativa* L.) grown in tropical environment. **Ciência Rural**, v. 44, n. 12, p. 2136–2141, dez. 2014.

ZHAO, Y. et al. Control of Plant Water Use by ABA Induction of Senescence and Dormancy: An Overlooked Lesson from Evolution. **Plant and Cell Physiology**, v. 58, n. 8, p. 1319–1327, 1 ago. 2017.

ZHOU, X. et al. Selenium Biofortification and Interaction With Other Elements in Plants: A Review. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 586421, 5 nov. 2020.

CAPÍTULO II - BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO GERGELIM (*Sesamum indicum* L.) COM SELÊNIO

RESUMO

A biofortificação agronômica surge como estratégia para aumentar a disponibilidade de Se nos alimentos, promovendo segurança alimentar e saúde humana. No Brasil, o cultivo de gergelim (*Sesamum indicum* L.) vem se expandindo significativamente, destacando-se como alternativa agrícola viável para biofortificação. O objetivo desse estudo foi avaliar a biofortificação agronômica do gergelim com Se, determinando sua eficiência na absorção e translocação do elemento para os grãos e verificando os impactos na produção e qualidade nutricional da cultura. O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Universidade Federal de Lavras – MG, utilizando um delineamento experimental em blocos casualizados em esquema fatorial 2×5 , com quatro repetições. Os tratamentos consistiram na aplicação de cinco doses de Se (0, 25, 50, 100 e 200 μg vaso⁻¹), na forma de selenato de sódio (Na_2SeO_4), em duas cultivares de gergelim (BRS Anahí e Seda). Foram avaliados a matéria seca da parte aérea e dos grãos, a produtividade e a translocação de Se e outros nutrientes essenciais para as plantas. A análise estatística foi realizada utilizando ANOVA, com médias comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). A aplicação de Se impactou positivamente a produção de grãos, aumentando sua produtividade em até 40% na dose de 25 μg vaso⁻¹. O teor de Se nos grãos ocorreu de forma crescente conforme aumentavam as doses aplicadas, demonstrando viabilidade para biofortificação agronômica. Além disso, o Se favoreceu a translocação de nutrientes como S, Mn e Zn, contribuindo para a qualidade nutricional dos grãos. Embora doses moderadas tenham sido benéficas, concentrações elevadas de Se podem reduzir a eficiência nutricional da cultura, indicando que a dose ideal deve ser cuidadosamente ajustada. As plantas de gergelim mostraram-se eficientes na absorção e translocação do Se para os grãos, promovendo benefícios nutricionais sem comprometer o crescimento da planta. A dose de 25 μg vaso⁻¹ mostrou-se mais adequada, pois promoveu ganhos produtivos e nutricionais sem induzir efeitos negativos na cultura. Este estudo reforça o potencial do gergelim como alternativa viável para programas de biofortificação, contribuindo para o enriquecimento nutricional da dieta humana.

Palavras-chave: produção de gergelim, fome oculta, selenato de sódio, micronutriente, fortificação agronômica.

ABSTRACT

Agronomic biofortification emerges as a strategy to increase selenium (Se) availability in foods, promoting food security and human health. In Brazil, sesame (*Sesamum indicum* L.) cultivation has been expanding significantly, standing out as a viable agricultural alternative for biofortification. The objective of this study was to evaluate the agronomic biofortification of sesame with Se, determining its efficiency in element uptake and translocation to the seeds and assessing impacts on yield and nutritional quality. The experiment was conducted in a greenhouse at the Federal University of Lavras – MG, using a randomized complete block design in a 2×5 factorial scheme with four replications. Treatments consisted of five Se doses (0, 25, 50, 100, and 200 μg per pot) applied as sodium selenate (Na_2SeO_4) to two sesame cultivars (BRS Anahí and Seda). Shoot and seed dry matter, seed yield, and the translocation of Se and other essential nutrients were evaluated. Statistical analysis was performed using ANOVA, with mean comparisons by Tukey's test ($p \leq 0.05$). Se application positively impacted seed yield, increasing productivity by up to 40% at the 25 μg per pot dose. Seed Se concentration rose proportionally with increasing doses, demonstrating feasibility for agronomic biofortification. Additionally, Se enhanced the translocation of nutrients such as S, Mn, and Zn, contributing to seed nutritional quality. Although moderate doses were beneficial, high Se concentrations can reduce the crop's nutritional efficiency, indicating that the optimal dose must be carefully adjusted. Sesame plants proved efficient in absorbing and translocating Se to the seeds, delivering nutritional benefits without compromising plant growth. The 25 μg per pot rate was the most appropriate, providing both productive and nutritional gains without inducing negative effects on the crop. This study reinforces the potential of sesame as a viable candidate for biofortification programs, contributing to the nutritional enrichment of the human diet.

Keywords: sesame production; hidden hunger; sodium selenate; micronutrient; agronomic fortification.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a produção de gergelim (*Sesamum indicum* L.) ganhou destaque nos últimos cinco anos, principalmente por causa do aumento nos preços dos insumos, como os fertilizantes, com produção saindo de 41 mil em 2018 para 361 mil toneladas em 2024, que representa aumento de 780% (CONAB, 2025).

O cultivo dessa planta no Brasil ocorre notadamente na segunda safra de verão, quando a janela de cultivo é menor e a distribuição das chuvas é irregular. O gergelim tem diversas características que justificam sua implantação nesse período, como elevada tolerância à seca e por possuir raízes vigorosas que penetram no perfil do solo, garantindo a absorção de água e nutrientes em profundidade. Além disso, a cultura representa uma alternativa de baixo investimento comparada a outras espécies já consolidadas no agronegócio brasileiro, como o milho e o sorgo.

O gergelim é uma oleaginosa de grande importância na alimentação humana e animal. Os grãos possuem elevados teores de óleo (45 a 55%), com alta qualidade nutricional, ricos em antioxidantes naturais, fibras, vitaminas do complexo B, nutrientes como cálcio (Ca), ferro (Fe) e magnésio (Mg), ômega 6 e 9, que contribuem para a saúde cardiovascular, além do ponto de fumaça do seu óleo ser considerado um dos melhores para o preparo de alimentos, aproximadamente, 183 °C (AMINI et al., 2023; LANGYAN et al., 2022; WEI et al., 2022).

Apesar de ser considerada uma cultura que necessita de menores quantidades de fertilizantes, é importante utilizar estratégias para otimizar a eficiência das plantas em absorver e translocar os nutrientes para os grãos. Diversas pesquisas têm demonstrado os efeitos benéficos do fornecimento de selênio (Se) às plantas, bem como a sua utilização em programas de biofortificação agrônômica para aumentar a sua ingestão na dieta humana, visto que é um elemento essencial para humanos e animais.

Um dos principais problemas na saúde humana é a deficiência nutricional com micronutrientes, especialmente de ferro (Fe), iodo (I), zinco (Zn) e Se (BAILEY; WEST JR.; BLACK, 2015). O Se está relacionado com diversas funções no corpo humano, como a regulação do funcionamento da tireoide, do sistema imunológico e nervoso, na ativação do sistema antioxidante celular e tem efeito antimutagênico, prevenindo o aparecimento de células cancerígenas.

Dessa forma, a adição de Se via adubação ao sistema produtivo se torna de extrema importância, pois é o método mais barato e rápido para aumentar o teor de

Se nos alimentos e garantir a ingestão da recomendação diária de 55 μg (INSTITUTE OF MEDICINE, 2000). Assim, o teor de Se nos alimentos está relacionado diretamente com a sua disponibilidade nos solos agrícolas.

No Brasil, os solos apresentam baixos teores de Se. Por isso, existe uma normativa técnica que regulamenta as quantidades desse elemento que podem ser adicionados aos fertilizantes (MAPA, 2018), pois a faixa entre o efeito benéfico e o tóxico é estreita e varia entre espécies. Em altas concentrações nas plantas, o Se pode causar danos celulares por aumentar a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) e por consequência, reduzir a produção das culturas. Em humanos, o excesso de Se causa selenose que pode ser fatal em casos extremos (ZHOU et al., 2020).

Por meio do fornecimento adequado de Se é possível aumentar a eficiência da planta em absorver e metabolizar os nutrientes para que ela expresse sua máxima produção, com grãos de alta qualidade nutricional e com teores de Se que garantam a ingestão diária adequada do nutriente pela população. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a biofortificação agrônômica do gergelim e encontrar a dose ideal que promova efeitos sinérgicos com os elementos, aumente a produção da cultura e possibilite a ingestão adequada de Se na dieta humana.

2. METODOLOGIA

2.1 Desenho experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Brasil. Foi utilizado o delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial 2×5 , com quatro repetições. Os tratamentos consistiram na aplicação via solo de cinco doses de Se (0, 25, 50, 100 e 200 $\mu\text{g vaso}^{-1}$), na forma de selenato de sódio (Na_2SeO_4), em duas cultivares de gergelim (BRS Anahí e Seda) fornecidos pela Embrapa Algodão.

2.2 Condições de cultivo

As plantas foram cultivadas em vasos de 5 dm^3 preenchidos com Latossolo Amarelo distrófico (LAd) (SANTOS et al., 2018) de textura franco-arenosa. As propriedades químicas e granulométricas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Análise química e granulométrica do solo utilizado no experimento, antes da adubação (TEIXEIRA et al., 2018)

LAd												
pH	K	P	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	m
	-----mg dm ⁻³ -----			-----cmol _c dm ⁻³ -----					-----%----			
4,60	24,82	0,98		0,69	0,0	0,2	2,50	0,75	0,95	3,25	23,2	21,1
MO	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S	Se			Areia	Silte	Argila
%	-----mg dm ⁻³ -----						-----%----					
	-											
1,7	0,60	74,0	4,9	0,46	0,08	2,1	<LD*			77	6	17

pH em água: potencial hidrogeniônico em água; Al: Alumínio– extrator: KCl 1 mol L^{-1} ; H + Al: Acidez potencial; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; K: Potássio; P: fósforo-Rem: Fósforo Remanescente; B: Boro; Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco; S: Enxofre– extrator: Fosfato monocálcio em ácido acético; MO: Matéria Orgânica– oxidação: $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 4N + H_2SO_4 10N; SB: Soma de Bases Trocáveis; t: Capacidade de Troca Catiônica efetiva; T: Capacidade de Troca Catiônica a pH 7 ; V: Saturação por bases; m: Índice de Saturação de Al. P, K, Fe, Zn, Mn e Cu – extrator: Mehlich 1, H + Al – Extrator: SMP; Se: U. S. EPA (2007), *Abaixo do limite de detecção do aparelho (0,08 mg kg^{-1}).

A calagem foi realizada conforme o método de saturação por bases visando aumentar a saturação por bases para 70% (CANTARELLA et al., 2022). O calcário foi aplicado na dose de 3,8 g vaso^{-1} , na proporção 3:1 de CaCO_3 e MgCO_3 (PA), homogeneizado e incubado por 30 dias, com umidade do solo próxima a 60% do volume total dos poros (VTP).

A adubação foi realizada seguindo recomendação proposta por CANTARELLA et al. (2022). Para os nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e enxofre (S), totalizando 4,3; 3,3; 6,9 g vaso⁻¹ de nitrato de potássio (KNO₃), sulfato de amônio ((NH₄)₂SO₄) e superfosfato triplo (CaH₄(PO₄)₂.H₂O), respectivamente, na semeadura. Os micronutrientes foram adicionados via solução de Hoagland e Arnon 1950 adaptada (foi utilizado 2,42 g L⁻¹ de MnSO₄.2H₂O ao invés do MnCl) (1 mL dm⁻³). Foram semeadas dez sementes de gergelim, e desbastadas quando haviam dois pares de folhas totalmente expandidas, permanecendo duas plantas vigorosas por vaso.

O Se foi aplicado na superfície do solo durante a semeadura por meio de uma solução estoque produzida com 75 mg de selenato de sódio em um balão volumétrico de 100 mL, dessa solução estoque foram retirados 10 mL e o volume completado para 250 mL com água destilada. Assim, para as doses 0, 25, 50, 100 e 200 µg vaso⁻¹ foram aplicados ao solo 0, 1, 2, 4 e 8 mL vaso⁻¹, respectivamente.

A adubação de cobertura foi realizada aos 30 dias após a semeadura (DAS) em que foram adicionados 3,8 e 3,4 g vaso⁻¹ de cloreto de potássio (KCl) e ureia ((NH₂)₂CO), respectivamente. Durante o ciclo da cultura, o controle de insetos foi realizado de forma manual e os dados de temperatura e umidade relativa do ar foram mensurados usando data loggers do modelo UX100-003 (HOBO) (Figura 3).

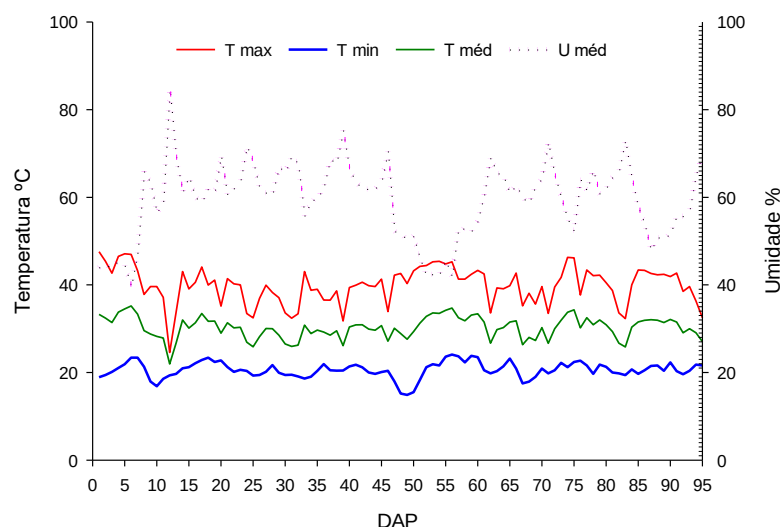


Figura 3. Dados de temperatura e umidade relativa do ar durante o ciclo do gergelim, de 18 de setembro a 22 de dezembro de 2023. Lavras- MG, 2023.

2.3 Amostragem, colheita e produção

A colheita foi realizada aos 95 DAS. As plantas foram cortadas rente ao solo, separadas em parte aérea e grãos, armazenadas em sacos de papel e colocadas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até atingir peso constante ($\pm$ 72 horas). Em seguida, foram pesadas para aferir a matéria seca da parte aérea e dos grãos. O peso dos grãos secos foi corrigido para 6% de umidade para obtenção da produção. Como havia duas plantas por unidade experimental, o valor médio das duas plantas foi utilizado para os demais cálculos. Em seguida, o material vegetal foi moído em moinho tipo Willey e submetido a análises químicas para determinação dos teores de nutrientes e Se.

2.4 Procedimento de digestão da amostra para análises elementares

Os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn foram determinados conforme metodologia descrita por Malavolta et al. (1997). O teor total de Se nas amostras de parte aérea e grãos de gergelim foi determinado após digestão ácida (BENEDITO et al., 2025), com adaptações. Para isso, pesou-se 0,1 g de cada amostra da parte aérea e grão, em tubos de digestão TFM®, adicionou-se 1 mL de ácido nítrico (HNO_3) concentrado destilado. Essa mistura foi deixada em temperatura ambiente por 15 horas como pré-digestão. Posteriormente, 2 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 30% (v/v) foram adicionados aos frascos. Os recipientes foram tampados e inseridos no forno micro-ondas. As amostras foram aquecidas em uma rampa de temperatura até 175 °C por 10 min seguida por um tempo de espera de 10 minutos.

As amostras digeridas foram deixadas em temperatura ambiente e, após resfriamento foram transferidas para tubos de centrifuga e completadas para o volume de 10 ml com água ultrapura. Para validar a eficiência da digestão e o método de quantificação de Se, foi utilizado um material de referência certificado (BCR 402, White Clover, Institute for Reference Materials and Measurements, Bélgica).

2.5 Determinação dos elementos

O N foi determinado a partir da destilação pelo método Kjeldahl, conforme Malavolta et al., (1997). Os demais nutrientes foram lidos em espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) (Spectro, modelo Blue, Alemanha) com correção de fundo. O Se foi determinado por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS, Perkin Elmer, NexION 2000) com acidez final e teor de sólidos dissolvidos aceitáveis.

De posse dos teores de nutrientes e Se, foi calculado o acúmulo de nutrientes na parte aérea e grãos de gergelim multiplicando-se os teores dos elementos pela matéria seca de seus respectivos particionamentos da planta, macronutrientes (mg planta⁻¹), micronutrientes e Se (µg planta⁻¹).

2.6 Análise estatística

As suposições de independência, homocedasticidade e normalidade foram verificadas a partir dos gráficos dos resíduos e utilizando o pacote gvlma (PEÑA; SLATE, 2006). Para garantir que todas essas suposições fossem atendidas, quando necessário, os resultados dos dados foram transformados para a escala logarítmica natural. A análise de variância (ANOVA) foi realizada pelo teste F e, quando significativo, as médias foram comparadas por meio do teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Todas as análises e os gráficos foram feitos no software R versão 4.3.0 (R Development Core Team, 2023).

3. RESULTADOS

Não houve interação para produção de matéria seca, mas foi observado significância para o fator cultivar, em que a BRS Seda apresentou maior valor (25 g vaso⁻¹) em comparação a cultivar Anahí (Figura 4a). E na produtividade houve significância para o fator dose, atingindo cerca de 40, 30 e 35% de ganho de produtividade em relação ao controle, nas doses de 25, 50 e 100 µg vaso⁻¹ de Se, respectivamente (Figura 4b).

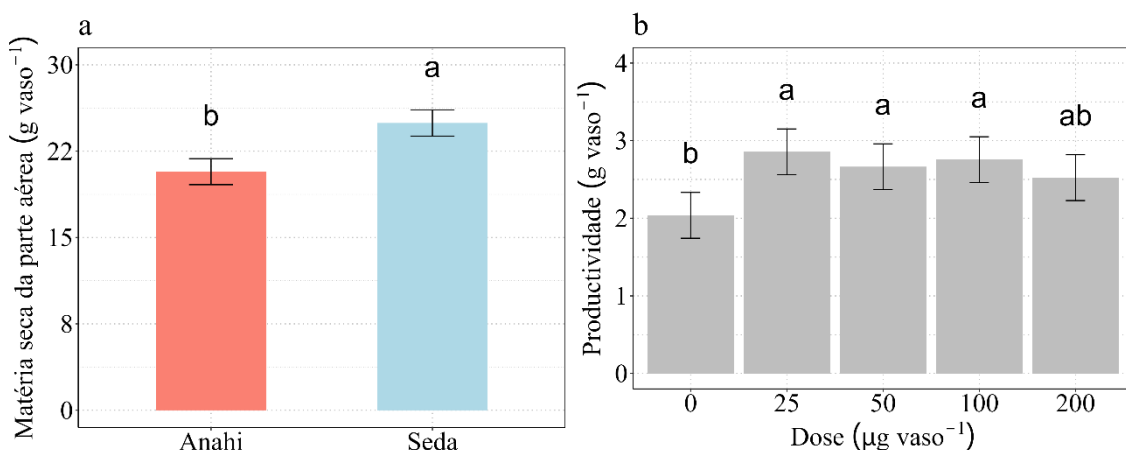


Figura 4. Matéria seca na parte aérea e produtividade de cultivares gergelim (BRS Anahí e BRS Seda) em função da aplicação de doses de Se via solo (µg vaso⁻¹). Médias seguidas da mesma letra não se diferem pelo teste Tukey ($p > 0,05$).

O resultado de acúmulo de nutrientes na parte aérea do gergelim foi significativo apenas para cultivares, demonstrando que a BRS Seda acumulou maiores quantidades de N, P, K, Ca e Mg quando comparado com a cultivar Anahí (Figura 5). O acúmulo de S na parte aérea do gergelim não foi significativo para nenhum dos fatores, cultivar ou dose, com médias variando de 46 a 48 mg vaso⁻¹ (Apêndice - Tabela 1).

No acúmulo de micronutrientes da parte aérea foram observados resultados significativos para cultivar nos elementos Cu e Zn e interação entre doses e cultivares para Mn. A cultivar BRS Seda acumulou mais Cu e Zn em comparação com a BRS Anahí, enquanto o acúmulo de Mn variou com a dose de Se aplicada e a cultivar, com a dose 50 µg vaso⁻¹, mostrando o maior acúmulo para a cultivar BRS Seda (Figura 6). Os micronutrientes B e Fe não apresentaram diferenças significativas, com valores

médios de acúmulo de 1.959 e 3.426 $\mu\text{g vaso}^{-1}$, respectivamente (Apêndice – Tabela 2).

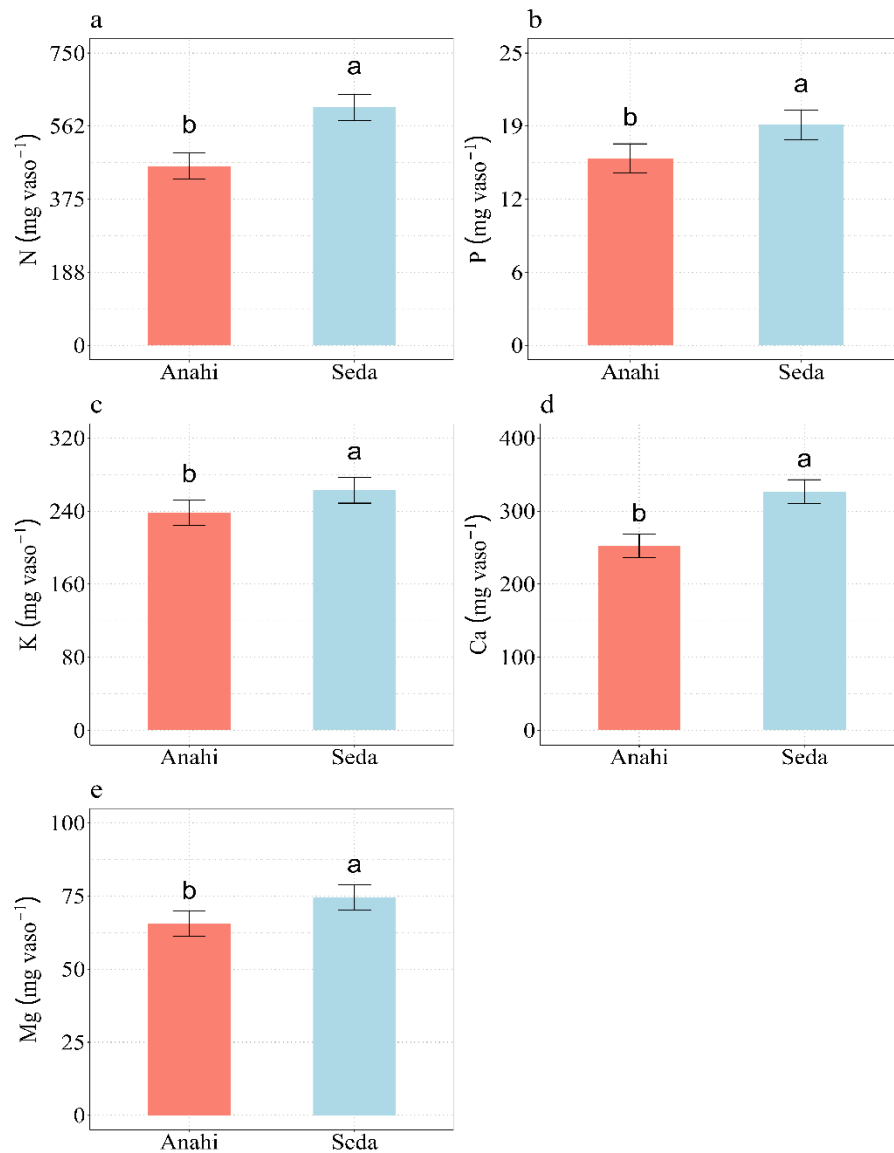


Figura 5. Acúmulo de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na parte aérea de cultivares de gergelim (BRS Anahí e BRS Seda) em função da aplicação de doses de Se via solo ($\mu\text{g vaso}^{-1}$). Médias seguidas da mesma letra não se diferem pelo teste Tukey ($p > 0,05$).

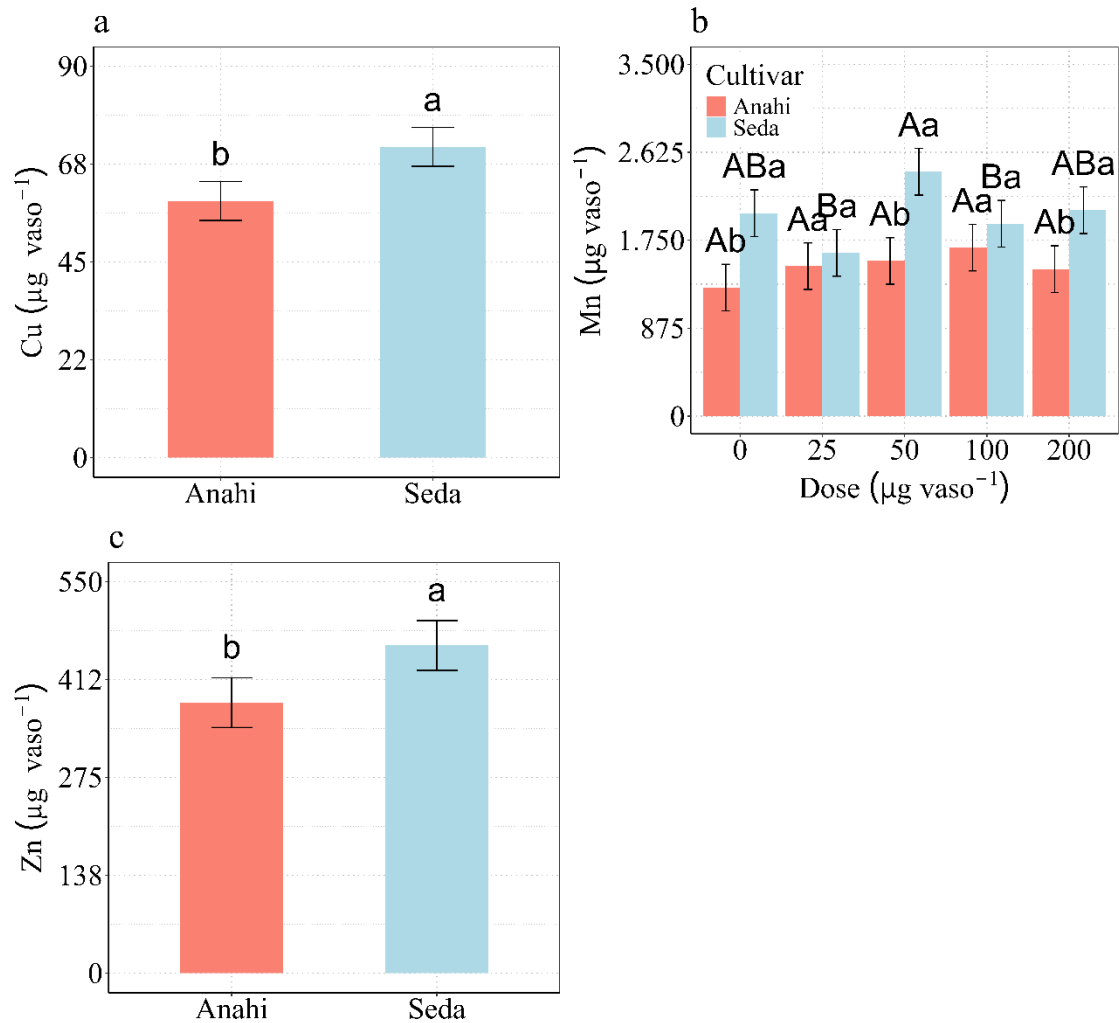


Figura 6. Acúmulo de cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn) na parte aérea de cultivares de gergelim (BRS Anahí e BRS Seda) em função da aplicação de doses de Se via solo ($\mu\text{g vaso}^{-1}$). Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Tukey ($p > 0,05$). Em cada dose, letras minúsculas comparam as cultivares, e letras maiúsculas comparam as doses em cada cultivar.

Os resultados do acúmulo de macronutrientes nos grãos não indicam um padrão na alteração dos valores com o aumento das doses de Se, mas houve diferença significativa nos tratamentos (Figura 7). Para N, foi observado que a dose $50 \mu\text{g vaso}^{-1}$ teve o menor acúmulo quando comparado com a dose de $25 \mu\text{g vaso}^{-1}$, enquanto as demais doses não diferiram do controle.

No acúmulo de P, K e Mg, houve incremento no acúmulo a partir da aplicação de Se, sendo que a dose de $25 \mu\text{g vaso}^{-1}$ proporcionou aumento de 48, 33 e 39%, respectivamente, comparada ao controle. Para Ca, houve diferença significativa referente a dose e cultivar de forma separada, sem interação entre os fatores

estudados. A cultivar BRS Seda teve maior acúmulo de Ca nos grãos em comparação com a BRS Anahí, independentemente da dose aplicada. Além disso, foi observado aumento de aproximadamente 50% no acúmulo do nutriente no grão na dose 25 μg vaso⁻¹.

O acúmulo do S nos grãos apresentou interação entre as cultivares e doses de Se, onde a cultivar BRS Seda teve destaque no acúmulo desse nutriente na dose 100 μg vaso⁻¹. No entanto, houve redução no acúmulo de aproximadamente 41% na dose 200 μg vaso⁻¹ (Figura 7f).

Observando a cultivar BRS Anahí, há aumento de 63% no acúmulo do nutriente a partir da dose de 25 μg vaso⁻¹ de Se, havendo pequena redução nas doses seguintes, não diferindo estatisticamente do maior acúmulo e do controle. Ainda, a cultivar BRS Seda tende a acumular mais S no grão quando comparada a BRS Anahí no controle e na dose 100 μg vaso⁻¹, indicando maior eficiência de translocação do nutriente. Pela análise estatística, não houve diferença no acúmulo da parte aérea, mas observa-se uma maior relação fonte-dreno na cultivar BRS Seda, a partir dos resultados dos grãos.

Os valores de acúmulo de micronutrientes nos grãos estão demonstrados na figura 8, em que é possível observar que houve aumento no acúmulo de B, onde a dose 100 μg vaso⁻¹ se destacou com o maior valor acumulado, aproximadamente 46 μg vaso⁻¹.

Referente ao Cu, foi possível observar resultados significativos de forma isolada para dose e cultivar. Houve aumento no acúmulo de Cu com a aplicação de Se, destacando-se as doses 25 e 50 μg vaso⁻¹, seguida pelas demais que também não diferiram estatisticamente do controle. Ainda, a cultivar BRS Seda acumulou aproximadamente 24% mais Cu do que a BRS Anahí.

Em relação ao Fe, somente foram observados resultados significativos para cultivar, a BRS Seda acumulou mais do nutriente no grão quando comparada a BRS Anahí, com valores médios de 191 e 136 μg vaso⁻¹, respectivamente, representando diferença de 40%, aproximadamente.

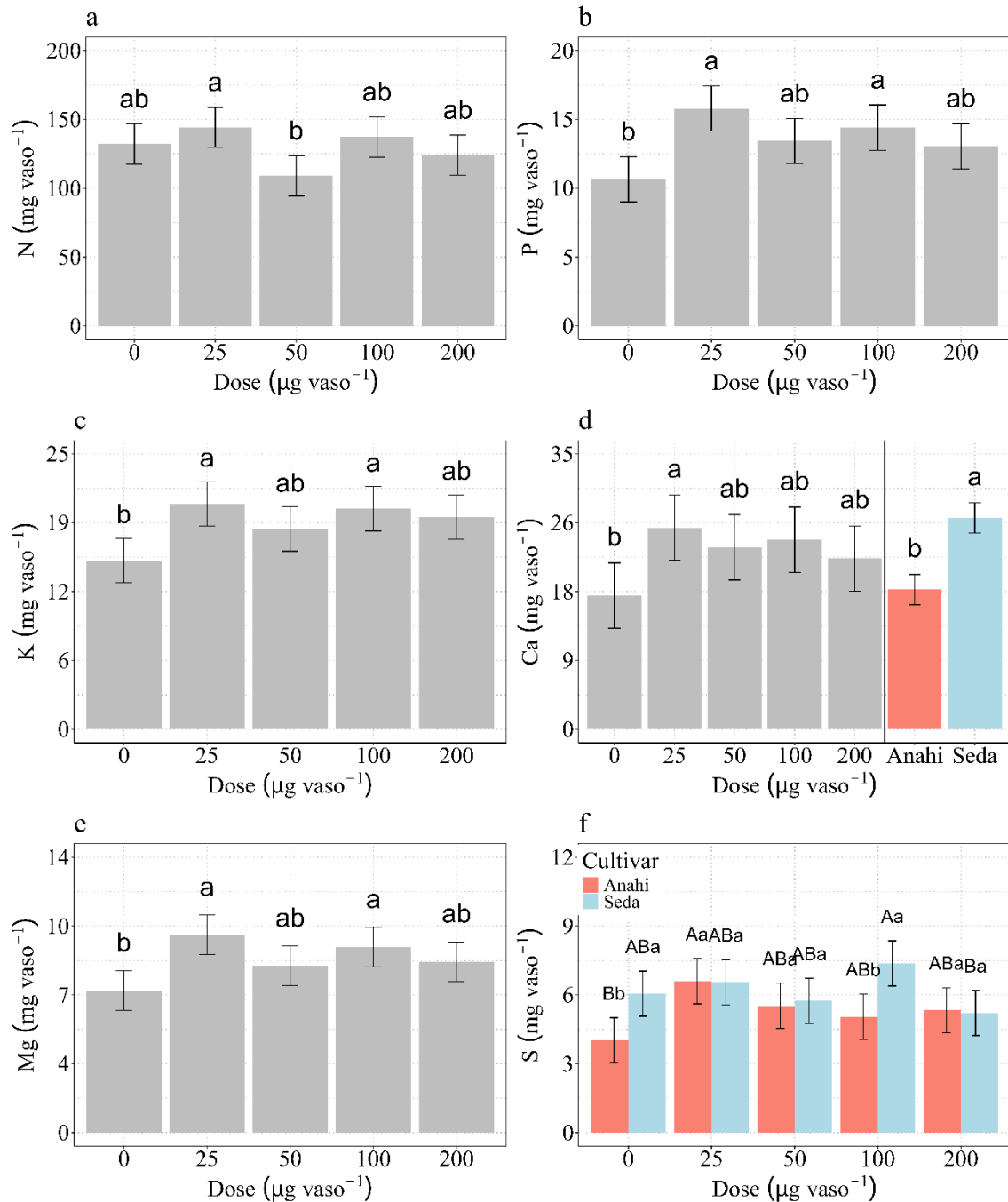


Figura 7. Acúmulo de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) nos grãos de cultivares de gergelim (BRS Anahi e BRS Seda) em função da aplicação de doses de Se via solo ($\mu\text{g vaso}^{-1}$). Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Tukey ($p > 0,05$). Em cada dose, letras minúsculas comparam as cultivares, e letras maiúsculas comparam as doses em cada cultivar.

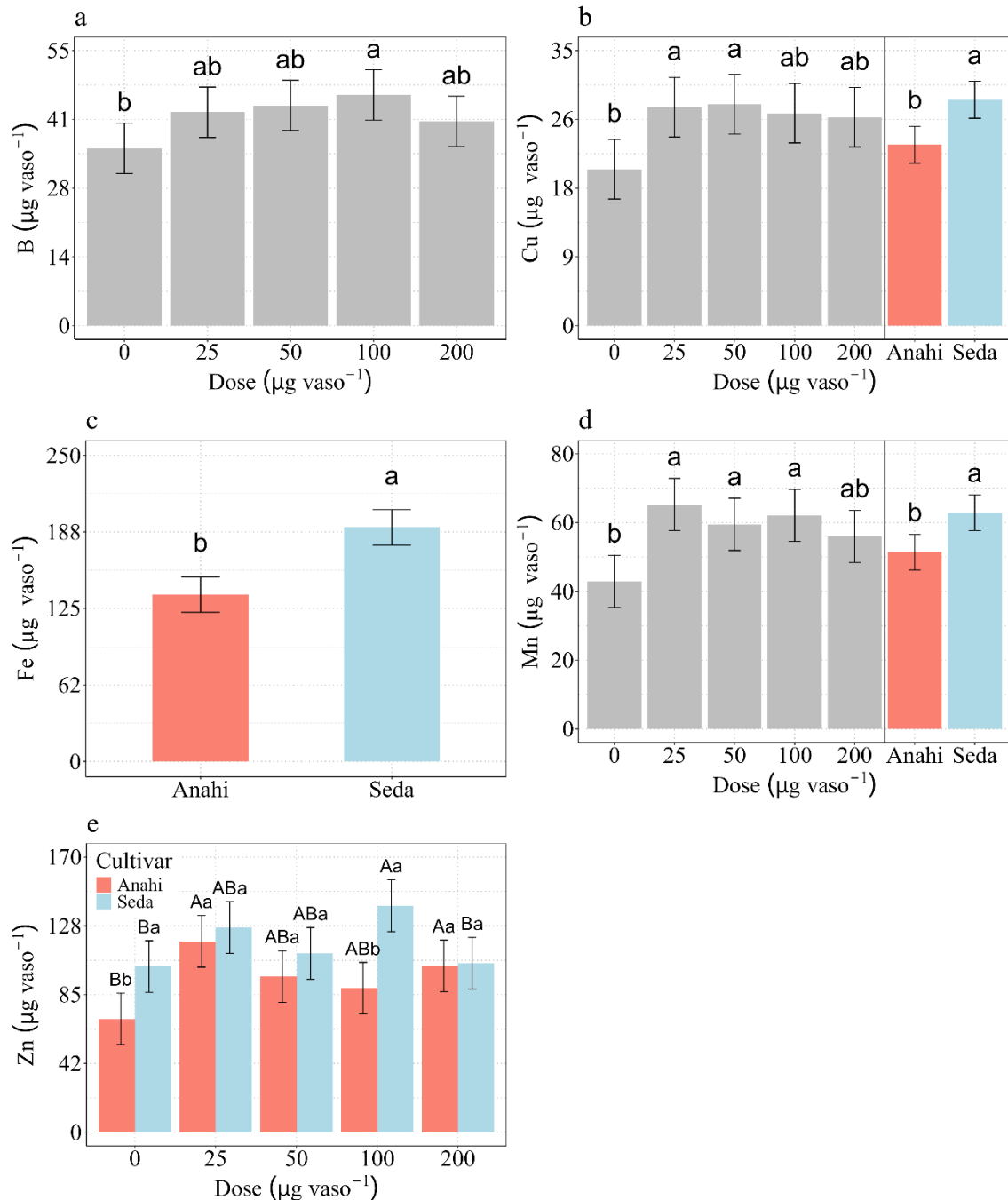


Figura 8. Acúmulo de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Z) nos grãos de cultivares de gergelim (BRS Anahi e BRS Seda) em função da aplicação de doses de Se via solo ($\mu\text{g vaso}^{-1}$). Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Tukey ($p > 0,05$). Em cada dose, letras minúsculas comparam as cultivares, e letras maiúsculas comparam as doses em cada cultivar.

O acúmulo de Mn no grão foi semelhante ao do Cu, em que foram observadas diferenças estatísticas para dose e para cultivar, sem interação entre eles. Na dose $200 \mu\text{g vaso}^{-1}$, observa-se uma pequena redução no acúmulo, porém, não difere das

demais. Ainda para esse nutriente, a cultivar BRS Seda acumulou mais Mn nos grãos ($62 \mu\text{g vaso}^{-1}$), sendo superior a BRS Anahí ($51 \mu\text{g vaso}^{-1}$).

Os resultados de acúmulo de Se demonstram variação na absorção e na translocação do elemento pela planta (Figura 9). Houve interação no acúmulo de Se na parte aérea da planta entre dose e cultivar, em que observa-se que a cultivar BRS Seda tem maior eficiência para absorver o elemento a partir da dose $50 \mu\text{g vaso}^{-1}$, sendo superior a BRS Anahí, que não respondeu as aplicações de Se a partir da dose de $25 \mu\text{g vaso}^{-1}$, diferindo apenas do controle. Na cultivar BRS Seda, ao aplicar Se, houve aumento no acúmulo quando comparado ao controle, sendo que a dose $200 \mu\text{g vaso}^{-1}$ teve destaque com maior valor, $18,69 \mu\text{g vaso}^{-1}$.

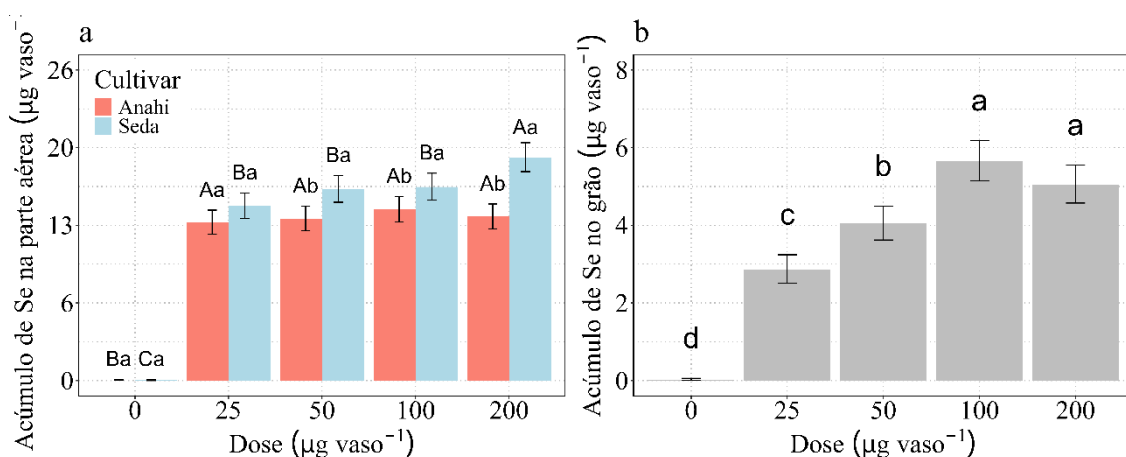


Figura 9. Acúmulo de Se na parte aérea e nos grãos de cultivares de gergelim (BRS Anahi e BRS Seda) em função da aplicação de doses de Se via solo ($\mu\text{g vaso}^{-1}$). Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Tukey ($p > 0,05$). Em cada dose, letras minúsculas comparam as cultivares, e letras maiúsculas comparam as doses em cada cultivar.

O aumento no acúmulo de Se foi observado nos grãos a partir da aplicação de $25 \mu\text{g vaso}^{-1}$, onde as doses de 100 e $200 \mu\text{g vaso}^{-1}$ foram superiores às demais, acumulando 5,6 e $5 \mu\text{g vaso}^{-1}$, respectivamente. Não foi observado resultado significativo para cultivar no acúmulo de Se no grão, obtendo valor médio das cultivares de $3,5 \mu\text{g vaso}^{-1}$.

A análise de componentes principais na parte aérea e no grão (Figura 10) revela que a PCA 1 e PCA 2 representam 67,89 e 73,95% do total da variância dos dados. Na parte aérea da planta, é possível confirmar que a produção tem correlação positiva com aplicação de Se, além de confirmar que a cultivar BRS Seda foi responsável pelo maior acúmulo de nutrientes.

No grão, a PCA mostra que, embora a maior parte do acúmulo de nutrientes tenha sido pela BRS Seda, a produção não foi diferente entre as duas cultivares. A aplicação de Se está correlacionada de forma positiva com a maioria dos nutrientes, com as setas mostrando tendência em direção às doses menores. A suplementação com pequenas doses de Se, em especial $5 \mu\text{g vaso}^{-1}$ de Se, possibilita o aumento no acúmulo do elemento e produção para ambas as cultivares. Além disso, é possível observar incremento no acúmulo de nutrientes nos grãos.

A correlação de Pearson da parte aérea (Figura 11) mostra correlação positiva com o acúmulo de Se e teor de Se na parte aérea, onde ao aumentar a dose, maior é o acúmulo do elemento. Não houve correlação negativa com nenhuma outra variável.

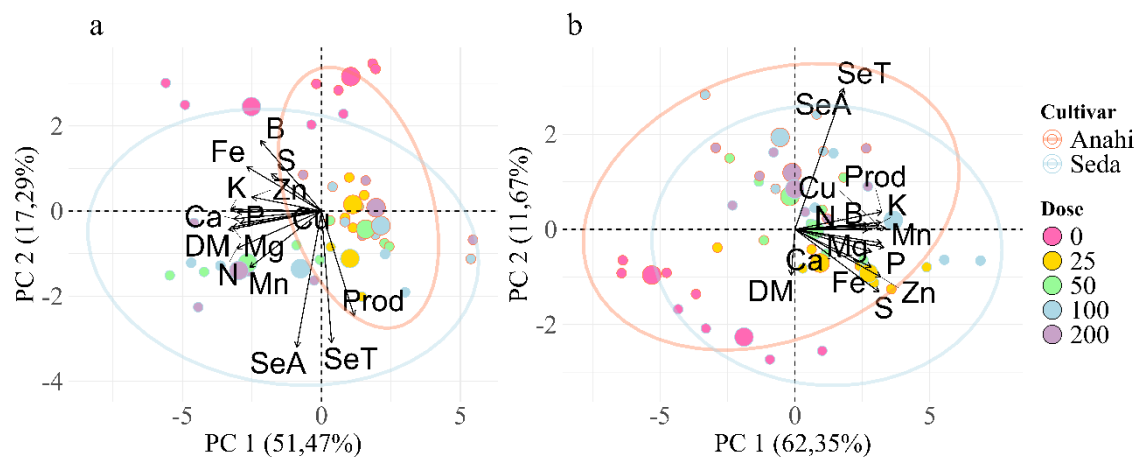


Figura 10. Análise de componentes principais na parte aérea (a) e no grão (b) de duas cultivares de gergelim (BRS Anahi e BRS Seda) com aplicação de doses de selênio via solo ($\mu\text{g vaso}^{-1}$), cultivados em casa de vegetação. Acúmulo de Se (SeA), teor de Se (SeT), produtividade (Prod), matéria seca (MS).

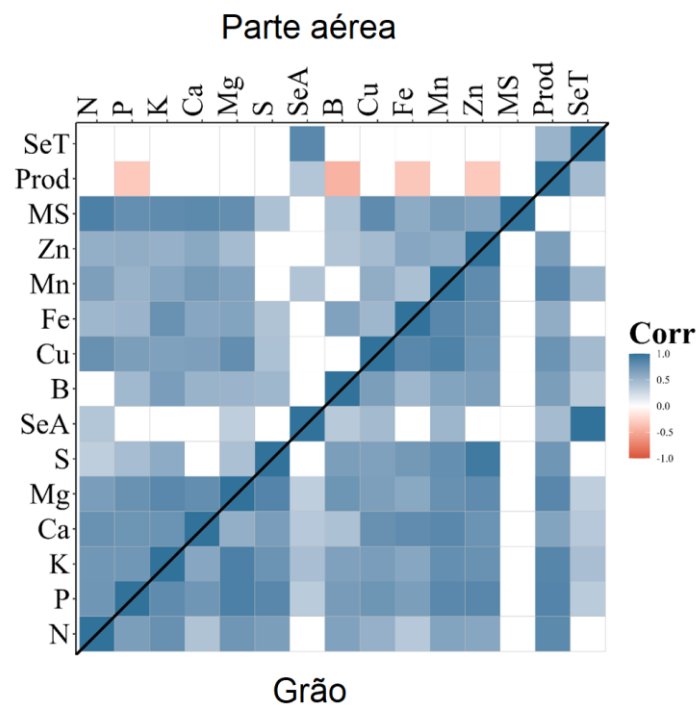


Figura 11. Correlação de Person na parte aérea e no grão de duas cultivares de gergelim (valores médios) com aplicação de doses de selênio via solo ($\mu\text{g vaso}^{-1}$), cultivados em casa de vegetação. Acúmulo de Se (SeA), teor de Se (SeT), produtividade (Prod), matéria seca (MS).

4. DISCUSSÃO

O fornecimento de Se em doses crescentes via solo foi eficiente para a biofortificação agronômica nas duas cultivares de gergelim, aumentando o acúmulo tanto na parte aérea quanto nos grãos. Resultados semelhantes foram encontrados em sorgo, arroz e trigo, mesmo com diferenças no número de aplicações e estádios de desenvolvimento da espécie (CIPRIANO et al., 2023; DE LIMA LESSA et al., 2020; SOUZA et al., 2014).

O acúmulo de Se pode variar de acordo com a espécie e a cultivar utilizada (CABRAL GOUVEIA et al., 2020a; SILVA et al., 2021). Silva et al. (2021) observaram variações de pelo menos duas vezes a concentração de Se nos grãos entre os genótipos de feijão caupi. Esses estudos demonstram a importância de selecionar materiais genéticos que tenham eficiência não só em absorver o elemento, como também em translocá-lo para o órgão de interesse, nesse caso, o grão. Pois o cálculo da ingestão diária é baseado no consumo do alimento, por consequência, o genótipo que acumula menos Se, terá que ser consumido em maior quantidade para atender a necessidade da ingestão diária.

Os efeitos benéficos da aplicação de Se nas plantas já estão bem consolidados na literatura (AHMAD et al., 2016; ANDRADE et al., 2018; DOS SANTOS et al., 2024a), embora não seja considerado um elemento essencial para elas. Nesse sentido, aumentar o acúmulo desse elemento nas partes comestíveis das plantas sem que haja toxidez e declínio na produção tem sido amplamente pesquisado pelos programas de biofortificação agronômica. A partir disso, são implementados novos direcionamentos afim de orientar o produtor para uma adubação eficiente e rentável nos diversos sistemas de plantio.

Neste trabalho, os resultados não mostraram diferenças significativas na produção de matéria seca quanto às doses aplicadas, mas houve incremento na produção de grãos por planta (Figura 2). Outros autores também tiveram resultados semelhantes no incremento da produção com a aplicação de Se em pesquisas com soja (SILVA et al., 2022), arroz (BOLDRIN et al., 2013), café (MATEUS et al., 2021), trigo (DOS SANTOS et al., 2024a) e gergelim (THUC et al., 2021).

Esses incrementos em produção são observados principalmente em plantas sob condições de estresses abióticos e bióticos. Nesta pesquisa, embora não tenha havido indução do estresse, houve um período com temperaturas elevadas, chegando a 45 °C dentro da casa de vegetação (Figura 1). Assim, o Se quando em pequenas

doses, pode prevenir o estresse oxidativo por aumentar a atividade enzimática e não enzimática, melhorando a eficiência do sistema de defesa da planta (DJANAGUIRAMAN; PRASAD; SEPPANEN, 2010; LANZA; REIS, 2021).

Para o acúmulo de nutrientes na parte aérea, de forma geral, a cultivar BRS Seda obteve maiores valores comparada a BRS Anahí (Figura 3). A absorção nutricional em cultivares da mesma espécie pode alterar por diversos fatores, como localização geográfica, duração do ciclo, capacidade de produção, estádios fenológicos em que receberam adubação e fatores genéticos (BENDER et al., 2013; CORDEIRO; GALDI; ECHER, 2025; SILVA et al., 2018). Assim, uma cultivar pode ser mais eficiente na utilização dos elementos comparada a outra que absorve e acumula maiores quantidades, com produção semelhante.

Ainda, houve interação entre dose e cultivar no acúmulo de Mn na parte aérea da planta (Figura 4). Observe que na dose 10 g ha^{-1} , a cultivar BRS Seda se destacou no acúmulo de Mn. Esse nutriente tem grande importância no metabolismo oxidativo, pois ele compõe uma das isoformas da enzima superóxido dismutase, a Mn-SOD (BROADLEY et al., 2012), que é a primeira na linha de atuação contra estresses abióticos (SAIDI; CHTOUROU; DJEBALI, 2014).

Assim, aplicação do Se, em pequena dose, pode ter induzido o maior acúmulo desse nutriente em situação de alta temperatura na casa de vegetação. Em trabalhos com oliveiras e tomateiros, também foram observados aumentos desse elemento no tecido foliar quando aplicado Se (ALVES et al., 2020; D'AMATO et al., 2018).

Em contrapartida, ao observar o acúmulo de nutrientes nos grãos, as menores doses de Se influenciaram os resultados positivamente, com maiores valores de P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Mn e Zn (Figuras 5 e 6). Aumentos nas quantidades de nutrientes nos grãos com aplicação de Se em pequenas quantidades também foram relatados por outros autores na cultura do arroz de sequeiro (REIS et al., 2018, 2020).

Moulick et al. (2018) observaram que plantas que tiveram tratamento de sementes com Se absorveram e translocaram maiores quantidades de micronutrientes sob condição de estresse quando comparados ao controle. Ainda não se sabe de forma efetiva como o Se interfere na utilização dos micronutrientes pelas plantas, mas a presença de Se pode alterar o coeficiente de permeabilidade iônica na membrana plasmática, alterando assim o transporte e o acúmulo de micronutrientes nas células vegetais (PAZURKIEWICZ-KOCOT; KITA; PIETRUSZKA, 2008).

O acúmulo de N nos grãos não foi maior com aplicação de Se, havendo redução no acúmulo na dose 10 comparada a dose 25 $\mu\text{g vaso}^{-1}$. Esse resultado é importante, pois o N atua diretamente ativando o metabolismo de S, aumentando a assimilação dele e das proteínas. A aplicação de Se pode afetar o metabolismo do N, a biossíntese de proteínas e aminoácidos, principalmente a fenilalanina, que é precursor de compostos fenólicos como flavonoides (GOLUBKINA; KEKINA; CARUSO, 2018). Apesar da diminuição no acúmulo de N no grão, não houve redução na produção de biomassa e grão, mas é importante ficar atento para as características de qualidade desse material, como proteínas e qualidade do óleo.

A interação no acúmulo S nos grãos demonstra claramente o comportamento entre espécies, pois a cultivar BRS Anahí teve aumento no acúmulo a partir a menor dose aplicada. Ao contrário, a cultivar BRS Seda não diferiu estatisticamente do controle até a dose 100 $\mu\text{g vaso}^{-1}$, com significativa redução na dose seguinte, demonstrando possível interação antagônica na dose 200 $\mu\text{g vaso}^{-1}$ fazendo com que houvesse redução no acúmulo do elemento.

A relação entre Se e S é a mais estudada, devido à similaridade entre esses elementos (BOCCHINI et al., 2018), que compartilham a mesma via metabólica e utilizam os mesmos transportadores (SULTR), que são proteínas transportadoras de S nas plantas (WHITE, 2015). É possível que a aplicação de Se aumente a absorção de S (WHITE, 2004), mas interações negativas entre S e Se também foram observadas em trabalho com rabanete (DA SILVA et al., 2020).

A disponibilidade adequada de S para o gergelim deve ser cuidadosamente atendida, principalmente se a produção é para a indústria do óleo. O S é um nutriente de plantas muito importante, especialmente para oleaginosas, pois elas necessitam mais desse elemento comparados a outras espécies por aumentar o teor de proteína e óleo na semente (RAZA et al., 2018). Quando há deficiência de S, há reduções significativas no teor de óleo e na qualidade da semente (GIRONDE et al., 2014).

Em diversos trabalhos na literatura é citada a interação antagônica do Se com os nutrientes (GUI et al., 2022a; ISMAEL et al., 2019; LANZA; REIS, 2021; ZHOU et al., 2020), o que, de forma geral, não foi observado neste trabalho, reforçando a ideia de que pequenas doses não trazem efeitos tóxicos às plantas, neste caso, o gergelim. Altas concentrações de Se nas plantas pode promover a degradação da clorofila e aumentar o estresse oxidativo (CABRAL GOUVEIA et al., 2020b). Mas em baixas concentrações, pode trazer diversos benefícios, como já citados acima.

É importante ressaltar que variados estudos demonstram que a aplicação foliar é mais eficiente que a via solo em virtude das diversas interações do Se com características do solo e matéria orgânica (CIPRIANO et al., 2022; LESSA et al., 2016; ROS et al., 2016; YUAN et al., 2023). Com destaque para o pH do solo, onde em condições menos ácidas, o Se se torna consideravelmente mais disponível para as plantas, sobretudo devido a solubilidade das espécies de Se (LESSA et al., 2016).

Mas, é necessário reforçar a informação de que a produção comercial de gergelim é uma prática relativamente nova no Brasil, que ganhou destaque nos últimos cinco anos por ser mais tolerante à seca, comparada a outras espécies utilizadas para o cultivo na safrinha e ter baixo investimento em manejos com adubação e pulverizações para controle de pragas e doenças. Assim, dessa forma, a aplicação de Se via solo, logo na semeadura, juntamente com os outros processos que já seriam feitos, torna-se um aliado, podendo aumentar a produção e o ganho econômico sem alterar tanto o investimento.

Nesse sentido, a utilização do elemento como benéfico para aumentar a produção e a qualidade do grão deve conduzida com cuidado, principalmente em locais onde o pH do solo é naturalmente mais alcalino. Pois, mesmo em pequena dose, a disponibilidade dele para as plantas pode aumentar de forma considerável, prejudicando o equilíbrio da absorção de nutrientes e causando interações antagônicas entre os elementos essenciais.

Estudos específicos nas diversas regiões que possuem condições edáficas variadas são necessários para garantir a recomendação da aplicação do elemento na dose ideal para situações particulares sem causar danos ao meio ambiente, às plantas e garantindo a segurança alimentar.

A suplementação com Se na alimentação humana a partir dos grãos de gergelim pode ser considerada com preço acessível, já que a recomendação da ingestão diária desse alimento é de 20 a 40 g por dia. Então, considerando que em 3,8 g de grãos tem 3,1 μg de Se, para a menor dose aplicada (Figura 2 e 7), ao consumir 40 g por dia do grão, a ingestão de Se será de 32,6 μg e 64 μg para a maior dose aplicada. Valores que ficam dentro do recomendado e abaixo do limite crítico que pode causar selenose, 55 $\mu\text{g dia}^{-1}$ e 400 $\mu\text{g dia}^{-1}$ (INSTITUTE OF MEDICINE, 2000).

Sendo assim, nas condições em que foi conduzido esse estudo, pode-se sugerir que é possível biofortificar o gergelim com Se e ainda aumentar de forma

significativa a produção de grãos da cultura. No entanto, avaliações na qualidade do grão, principalmente pensando no consumo in natura, são necessárias. Além de indicadores nutricionais como açúcares, proteínas, carboidratos, entre outros que garantam a segurança alimentar e o impacto na qualidade do óleo referente ao tempo de prateleira e o ponto de queima devem ser acompanhados.

5. CONCLUSÃO

A cultura do gergelim tem potencial para ser biofortificada com Se, independente da cultivar. A aplicação do elemento aumentou a produção apresentando boa absorção e translocação do elemento para os grãos. A cultivar BRS Seda acumulou maiores quantidades dos elementos, mas a BRS Anahí foi mais eficiente no uso deles. De forma geral, o aumento na dose de Se não favoreceu o contínuo aumento nos acúmulos de macro e micronutrientes, sendo que a dose de 25 μ vaso⁻¹ obteve os melhores resultados favorecendo um aumento considerável no acúmulo de nutrientes nos grãos.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, R. et al. Selenium (Se) improves drought tolerance in crop plants – a myth or fact? **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 2, p. 372–380, 30 jan. 2016.
- ALVES, L. R. et al. Mechanisms of cadmium-stress avoidance by selenium in tomato plants. **Ecotoxicology**, v. 29, n. 5, p. 594–606, jul. 2020.
- ANDRADE, F. R. et al. Selenium protects rice plants from water deficit stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 164, p. 562–570, nov. 2018.
- BENDER, R. R. et al. Nutrient Uptake, Partitioning, and Remobilization in Modern, Transgenic Insect-Protected Maize Hybrids. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 1, p. 161–170, jan. 2013.
- BOCCHINI, M. et al. Soil Selenium (Se) Biofortification Changes the Physiological, Biochemical and Epigenetic Responses to Water Stress in Zea mays L. by Inducing a Higher Drought Tolerance. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 389, 27 mar. 2018.
- BOLDRIN, P. F. et al. Soil and foliar application of selenium in rice biofortification. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 31, n. 2, p. 238–244, set. 2013.
- BROADLEY, M. et al. Function of Nutrients. Em: **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. [s.l.] Elsevier, 2012. p. 191–248.
- CABRAL GOUVEIA, G. C. et al. Selenium toxicity stress-induced phenotypical, biochemical and physiological responses in rice plants: Characterization of symptoms and plant metabolic adjustment. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 202, p. 110916, out. 2020a.
- CABRAL GOUVEIA, G. C. et al. Selenium toxicity stress-induced phenotypical, biochemical and physiological responses in rice plants: Characterization of symptoms and plant metabolic adjustment. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 202, p. 110916, out. 2020b.
- CIPRIANO, P. E. et al. Selenium biofortification via soil and its effect on plant metabolism and mineral content of sorghum plants. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 109, p. 104505, jun. 2022.
- CIPRIANO, P. E. et al. Selenate fertilization of sorghum via foliar application and its effect on nutrient content and antioxidant metabolism. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 115, p. 104865, jan. 2023.
- CORDEIRO, C. F. D. S.; GALDI, L. V.; ECHER, F. R. Nutrient uptake and removal by runner peanut cultivars of different maturity groups. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 49, p. e0240088, 27 fev. 2025.
- DA SILVA, D. F. et al. Biofortification with selenium and implications in the absorption of macronutrients in *Raphanus sativus* L. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 86, p. 103382, mar. 2020.

D'AMATO, R. et al. Determination of changes in the concentration and distribution of elements within olive drupes (cv. Leccino) from Se biofortified plants, using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n. 13, p. 4971–4977, out. 2018.

DE LIMA LESSA, J. H. et al. Strategies for applying selenium for biofortification of rice in tropical soils and their effect on element accumulation and distribution in grains. **Journal of Cereal Science**, v. 96, p. 103125, nov. 2020.

DJANAGUIRAMAN, M.; PRASAD, P. V. V.; SEPPANEN, M. Selenium protects sorghum leaves from oxidative damage under high temperature stress by enhancing antioxidant defense system. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 999–1007, dez. 2010.

DOS SANTOS, L. C. et al. Enhancing Wheat Resilience to Water Deficit through Selenium Biofortification: Perspectives on Physiological, Biochemical and Nutritional Responses. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 24, n. 4, p. 7418–7435, dez. 2024.

GIRONDÉ, A. et al. The impact of sulfate restriction on seed yield and quality of winter oilseed rape depends on the ability to remobilize sulfate from vegetative tissues to reproductive organs. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, 17 dez. 2014.

GOLUBKINA, N.; KEKINA, H.; CARUSO, G. Yield, Quality and Antioxidant Properties of Indian Mustard (*Brassica juncea* L.) in Response to Foliar Biofortification with Selenium and Iodine. **Plants**, v. 7, n. 4, p. 80, 27 set. 2018.

GUI, J.-Y. et al. Interaction between selenium and essential micronutrient elements in plants: A systematic review. **Science of The Total Environment**, v. 853, p. 158673, dez. 2022.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D.I. The water culture method for growing plants without soil. Berkeley, Calif. Agric. Exp. Station, 32p. 1950.

INSTITUTE OF MEDICINE. **Dietary Reference Intakes for Vitamin C, Vitamin E, Selenium, and Carotenoids**. Washington, D.C.: National Academies Press, 2000. p. 9810

ISMAEL, M. A. et al. Cadmium in plants: uptake, toxicity, and its interactions with selenium fertilizers. **Metallomics**, v. 11, n. 2, p. 255–277, 2019.

LANZA, M. G. D. B.; REIS, A. R. D. Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 164, p. 27–43, jul. 2021.

LESSA, J. H. L. et al. Adsorption-desorption reactions of selenium (VI) in tropical cultivated and uncultivated soils under Cerrado biome. **Chemosphere**, v. 164, p. 271–277, dez. 2016.

MATEUS, M. P. D. B. et al. Selenium biofortification enhances ROS scavenge system increasing yield of coffee plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 209, p. 111772, fev. 2021.

PAZURKIEWICZ-KOCOT, K.; KITA, A.; PIETRUSZKA, M. Effect of Selenium on Magnesium, Iron, Manganese, Copper, and Zinc Accumulation in Corn Treated by Indole-3-acetic Acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 39, n. 15–16, p. 2303–2318, set. 2008.

RAZA, M. A. et al. Sulphur application increases seed yield and oil content in sesame seeds under rainfed conditions. **Field Crops Research**, v. 218, p. 51–58, abr. 2018.

REIS, H. P. G. et al. Agronomic biofortification of upland rice with selenium and nitrogen and its relation to grain quality. **Journal of Cereal Science**, v. 79, p. 508–515, jan. 2018.

REIS, H. P. G. et al. Agronomic biofortification with selenium impacts storage proteins in grains of upland rice. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 100, n. 5, p. 1990–1997, 30 mar. 2020.

ROS, G. H. et al. Selenium fertilization strategies for bio-fortification of food: an agro-ecosystem approach. **Plant and Soil**, v. 404, n. 1–2, p. 99–112, jul. 2016.

SAIDI, I.; CHTOUROU, Y.; DJEBALI, W. Selenium alleviates cadmium toxicity by preventing oxidative stress in sunflower (*Helianthus annuus*) seedlings. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, n. 5, p. 85–91, mar. 2014.

SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro De Classificação De Solos**. [s.l.] Embrapa, 2018.

SILVA, C. G. M. et al. Macronutrient uptake and export in transgenic corn under two levels of fertilization. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 12, p. 1363–1372, dez. 2018.

SILVA, M. A. et al. Selenium biofortification of soybean genotypes in a tropical soil via Se-enriched phosphate fertilizers. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 988140, 14 set. 2022.

SILVA, V. M. et al. Application of sodium selenate to cowpea (*Vigna unguiculata* L.) increases shoot and grain Se partitioning with strong genotypic interactions. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 67, p. 126781, set. 2021.

SOUZA, G. A. et al. Genotypic variation of zinc and selenium concentration in grains of Brazilian wheat lines. **Plant Science**, v. 224, p. 27–35, jul. 2014.

THUC, L. V. et al. Foliar selenium application for improving drought tolerance of sesame (*Sesamum indicum* L.). **Open Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 93–101, 16 fev. 2021.

WHITE, P. J. Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 404, p. 1927–1937, 2 jul. 2004.

WHITE, P. J. Selenium accumulation by plants. **Annals of Botany**, p. mcv180, 29 dez. 2015.

YUAN, Z. et al. Effect of foliar spraying of organic and inorganic selenium fertilizers during different growth stages on selenium accumulation and speciation in rice. **Plant and Soil**, v. 486, n. 1–2, p. 87–101, maio 2023.

ZHOU, X. et al. Selenium Biofortification and Interaction With Other Elements in Plants: A Review. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 586421, 5 nov. 2020.

**CAPITULO III – O SELÊNIO ATIVA O SISTEMA ANTIOXIDANTE DO GERGELIM
(*Sesamum indicum* L.) SOB DÉFICIT HÍDRICO PROLONGADO.**

RESUMO

As mudanças climáticas têm aumentado a frequência de eventos extremos, como longos períodos de seca, principalmente na segunda safra de verão, onde a flutuação da precipitação é maior. O gergelim (*Sesamum indicum* L.) tem sido implantado nesse período como alternativo ao milho de segunda safra, com isso, o déficit hídrico reduz a eficiência do metabolismo da planta, comprometendo a sua produtividade. Para minimizar os danos causados pela restrição hídrica, estratégias como a aplicação de Se têm sido estudadas, pois esse elemento atua no sistema antioxidante das plantas, protegendo-as contra os efeitos deletérios do estresse ambiental. Neste contexto, objetivou-se com o estudo avaliar o impacto da aplicação de Se na tolerância do gergelim ao déficit hídrico e sua influência na absorção de nutrientes e na fisiologia da cultura. O experimento foi realizado em casa de vegetação, em delineamento de blocos ao acaso em esquema fatorial 4×2 , com quatro repetições. Foram testadas fontes de Se (mineral, orgânica e blend – mineral+orgânica) e controle (sem aplicação de Se) sob dois manejos hídricos (déficit hídrico e irrigado). Foram realizadas análises fisiológicas, nutricionais e de produção. O déficit hídrico impactou significativamente a fisiologia da planta, reduzindo a taxa fotossintética, a condutância estomática e a eficiência do uso da água. A aplicação de Se demonstrou efeitos benéficos, principalmente na fonte mineral, promovendo a recuperação das plantas após o período de estresse. A atividade das enzimas antioxidantes foi significativamente aumentada nos tratamentos que receberam Se, reduzindo os danos causados pelo estresse oxidativo. O acúmulo de Se nos grãos ocorreu de forma eficiente em todas as fontes aplicadas, apesar do déficit hídrico limitar sua translocação em algumas fontes. Apesar disso, o Se não foi suficiente para evitar perdas na produção sob déficit hídrico, independente da fonte. A aplicação de Se contribuiu para a melhora da resposta fisiológica das plantas ao déficit hídrico, protegendo-as contra o estresse oxidativo e favorecendo sua recuperação. Os resultados reforçam a importância do Se na proteção celular e na manutenção da funcionalidade fisiológica da planta, demonstrando seu potencial como estratégia de manejo para mitigar os efeitos negativos do déficit hídrico.

Palavras-chave: estresse fisiológico, mudanças climáticas, selenato de sódio, selênio orgânico, produção de gergelim.

ABSTRACT

Climate change has increased the frequency of extreme events, such as prolonged droughts, especially during the second summer crop season, when rainfall variability is greater. Sesame (*Sesamum indicum* L.) has been cultivated during this period as an alternative to second season corn, therefore, water deficit reduces the plant's metabolic efficiency, compromising its productivity. To minimize the damage caused by water restriction, strategies such as selenium (Se) application have been studied, as this element plays a role in the plant antioxidant system, protecting it against the harmful effects of environmental stress. In this context, the objective of the study was to evaluate the impact of Se application on sesame's tolerance to water deficit and its influence on nutrient uptake and crop physiology. The experiment was conducted in a greenhouse using a randomized block design in a 4 × 2 factorial scheme, with four replications. Se sources (mineral, organic, and blend – mineral + organic) and a control (no Se application) were tested under two water management conditions (water deficit and irrigated). Physiological, nutritional, and yield analyses were performed. Water deficit significantly affected plant physiology, reducing photosynthetic rate, stomatal conductance, and water use efficiency. Se application showed beneficial effects, especially with the mineral source, promoting plant recovery after the stress period. Antioxidant enzyme activity was significantly increased in treatments that received Se, reducing damage caused by oxidative stress. Se accumulation in seeds occurred efficiently across all applied sources, although water deficit limited its translocation in some cases. Nevertheless, Se was not sufficient to prevent yield losses under water deficit, regardless of the source. Se application contributed to improved physiological responses of plants to water deficit, protecting them against oxidative stress and aiding recovery. The results reinforce the importance of Se in cellular protection and maintaining plant physiological functionality, demonstrating its potential as a management strategy to mitigate the negative effects of water deficit.

Keywords: physiological stress, climate change, sodium selenate, organic selenium, sesame production.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas estão afetando a produção da agricultura no mundo, seja irrigada ou em sequeiro. Isso porque os eventos extremos, como seca, geada e altas temperaturas, estão cada vez mais frequentes (HUSSAIN et al., 2018). Diante disso, aliado à crescente demanda por alimentos no mundo com o aumento da população no planeta, a preocupação com a segurança alimentar tem sido pauta discutida, pois ela afeta 870 milhões de pessoas em todo o mundo (FYLES; MADRAMOOTOO, 2016).

Diante disso, a redução na produção leva a uma série de consequências sociais e econômicas. Projeta-se que a população mundial pode chegar em 9 bilhões até 2050 (VARSHNEY; ROORKIWAL; NGUYEN, 2013), mas além de aumentar a produção de alimentos, há de considerar que não apenas a quantidade é importante, a qualidade dos produtos e a sustentabilidade da produção devem ser consideradas.

Diversas pesquisas têm buscado estratégias para mitigar os efeitos deletérios dos estresses ambientais na produção das culturas, que são amplos e causam, principalmente, redução na produção e na qualidade dos alimentos. Sob estresse, a planta perde o turgor e o conteúdo de água no tecido, limita as trocas gasosas, diminuindo a atividade da fotossíntese, redução da transpiração que impacta diretamente na temperatura interna da planta (DJANAGUIRAMAN; PRASAD; SEPPANEN, 2010; DOS SANTOS et al., 2024; SANTOS et al., 2009).

Além disso, causam danos oxidativos com o aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (ERO's) (HUSSAIN et al., 2018), que danificam os lipídios da membrana e degradam pigmentos fotossintéticos, entre outros efeitos. (MATEUS et al., 2021; SAIDI; CHTOUROU; DJEBALI, 2014; THUC et al., 2021; VEGA-RAVELLO et al., 2023).

Diante disso, as pesquisas mostram diversas alternativas para contornar esses problemas. Um deles é a aplicação de elementos considerados benéficos para as plantas, como o selênio (Se) (AHMAD et al., 2016). Apesar de não ser considerado um nutriente de plantas, a literatura mostra que o Se atua ativamente na redução de radicais livres, protegendo a planta de morte celular, sobretudo no déficit hídrico (ANDRADE et al., 2018).

A presença de Se, em pequenas quantidades, pode melhorar a eficiência das trocas gasosas, o que reflete na fotossíntese e acúmulo de biomassa (SANTOS et al., 2024). Para adicionar Se ao sistema de cultivo, o selenato de sódio é um dos mais

conhecidos, mas ele pode interagir com as partículas do solo e matéria orgânica, reduzindo a eficiência de uso pela planta (KANG et al., 2024).

Para contornar esse problema, já existem diversas fontes com tecnologias diferentes que parecem melhorar a eficiência de utilização do elemento sem causar danos ao sistema. Como por exemplo o fertilizante orgânico de selênio, que não são facilmente fixados ao solo, solúveis em água e de baixo impacto ambiental (LI et al., 2023). Nesse caso, o Se é quelatado com um aminoácido, como exemplo, a glicina.

Outro fator importante a ser considerado diante das mudanças é a escolha da espécie. Nesse caso, o gergelim (*Sesamum indicum* L.) é uma espécie de planta que ganhou destaque nos últimos anos por causa dos seus grãos que tem alta qualidade nutricional e elevado teor de óleo no grão (45 a 55%). Além disso, é considerada uma cultura que possui tolerância a seca e se desenvolve bem em climas áridos e semiáridos (LANGYAN et al., 2022).

O sistema radicular do gergelim é eficiente, penetra com facilidade no solo para absorver água e nutrientes. No Brasil, vem ocupando o lugar de culturas já consolidadas na safrinha, como o milho, fazendo com que o produtor tenha menos riscos nesse período, onde a flutuação da precipitação é alta, pois o investimento com insumos agrícolas no gergelim é bastante inferior (CHRISTO et al., 2024).

Entretanto, em condições de seca, foram observadas reduções significativas na produção (HAILU et al., 2018). Nesse caso, é possível que a aplicação de Se, com fontes diferentes, possa mitigar os danos causados por estresses ambientais. Dito isso, objetivou-se com o trabalho avaliar como a aplicação de Se pode contribuir para reduzir os danos causados por déficit hídrico no metabolismo vegetal do gergelim.

2. METODOLOGIA

2.1 Condições de condução do experimento e design experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Brasil. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizado em esquema fatorial 4 x 2 com quatro repetições. Os tratamentos consistiam na aplicação de Se via solo, 20 g ha⁻¹, baseado em Reis, et al. (2020), com 4 fontes diferentes: fonte mineral (selenato de sódio, Na₂SeO₄), fonte orgânica (Se-Bisglicinato), blend (fonte mineral + orgânica) e o controle (sem aplicação de Se); e 2 manejos hídricos (déficit hídrico (DH) e irrigado (I)).

As plantas foram cultivadas em vasos com capacidade de 10 dm³ preenchidos com Latossolo Amarelo distrófico (LAd) (SANTOS et al., 2018) de textura franco-arenosa. As características químicas e granulométricas foram analisadas conforme Teixeira et al. (2018) e são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Análise química e granulométrica do Latossolo Amarelo distrófico utilizado no experimento antes da adubação

Latossolo amarelo distrófico												
pH	K	P	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	m
	mg dm ⁻³				cmol _c dm ⁻³						%	
4,60	24,82	0,98		0,69	0,0	0,2	2,50	0,75	0,95	3,25	23,2	21,1
MO	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S	Se			Areia	Silte	Argila
%	mg dm ⁻³										%	
1,7	0,60	74,0	4,9	0,46	0,08	2,1	<LD*			77	6	17

pH em água: potencial hidrogeniônico em água; Al: Alumínio– extrator: KCl 1 mol L⁻¹; H + Al: Acidez potencial; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; K: Potássio; P: fósforo-Rem: Fósforo Remanescente; B: Boro; Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco; S: Enxofre– extrator: Fosfato monocálcio em ácido acético; MO: Matéria Orgânica– oxidação: Na₂Cr₂O₇ 4N + H₂SO₄ 10N; SB: Soma de Bases Trocáveis; t: Capacidade de Troca Catiônica efetiva; T: Capacidade de Troca Catiônica a pH 7 ; V: Saturação por bases; m: Índice de Saturação de Al. P, K, Fe, Zn, Mn e Cu – extrator: Mehlich 1, H + Al – Extrator: SMP; *Abaixo do limite de detecção (0,08 mg dm⁻³).

A calagem foi realizada seguindo o método da saturação por bases, que é comumente utilizado no Brasil, visando aumentar a saturação por bases para 70% (CANTARELLA et al., 2022). O calcário foi aplicado na dose de 7,60 g vaso⁻¹, na proporção 3:1 de CaCO₃ e MgCO₃ puro para análise (PA), homogeneizado e incubado por 30 dias, com umidade do solo próxima a 60% do volume total de poros (VTP).

A adubação foi realizada seguindo recomendação proposta por CANTARELLA et al. (2022), para os nutrientes nitrogênio(N) , fósforo (P), potássio (K) e enxofre (S), totalizando 8,60; 6,61; 13,81 g vaso⁻¹ de nitrato de potássio (KNO₃), sulfato de amônio ((NH₄)₂SO₄) e superfosfato triplo (CaH₄(PO₄)₂.H₂O), respectivamente, na semeadura.

Os micronutrientes foram adicionados via solução de Hoagland e Arnon 1950 adaptada (foi utilizado 2,42 g L⁻¹ de MnSO₄.2H₂O ao invés do MnCl) (1 mL dm⁻³). Foram semeadas dez sementes de gergelim da cultivar BRS Anahí, e desbastadas quando as plântulas apresentaram dois pares de folhas totalmente expandidas, permanecendo duas plantas vigorosas por vaso.

O Se foi aplicado durante a semeadura, com duas fontes distintas, mineral (selenato de sódio) e selênio orgânico (Se-Bisglicinato). Foi adicionado ao solo via solução na superfície, na dose de 20 g ha⁻¹ de cada fonte, equivalente a 100 µg vaso⁻¹ de Se. A fonte blend foi composta pela mistura duas fontes, metade da dose de cada uma.

A adubação de cobertura foi realizada aos 30 dias após a semeadura (DAS) em que foram adicionados 7,63 e 6,86 g vaso⁻¹ de cloreto de potássio (KCl) e ureia ((NH₂)₂CO), respectivamente. Durante o ciclo da cultura, o controle de insetos foi realizado de forma manual e os dados de temperatura e umidade relativa do ar foram mensurados usando data loggers do modelo UX100-003 (HOBO) (Figura 1).

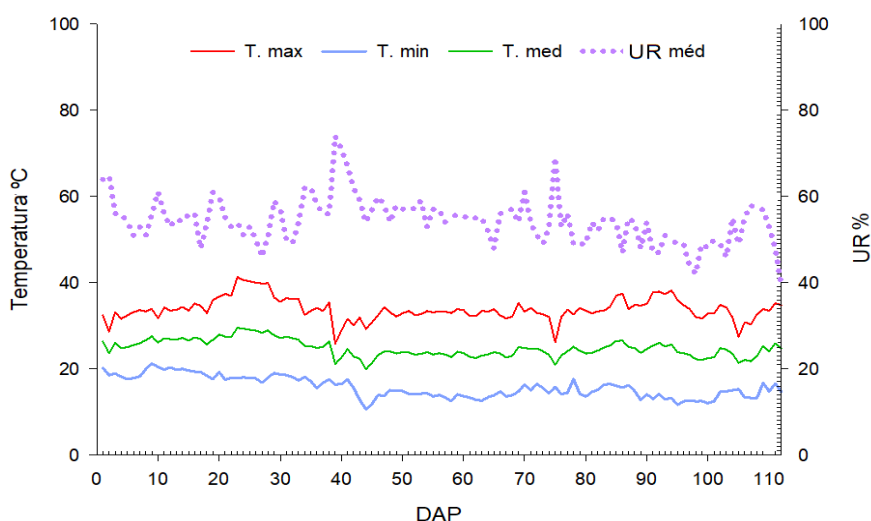


Figura 1. Temperatura máxima, média e mínima e umidade relativa do ar durante o ciclo de cultivo do gergelim em casa de vegetação, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

2.2 Déficit hídrico

Para garantir que as medições fossem precisas e acuradas, a calibração do sensor, Teros 11 (METER), foi realizada por meio da correlação entre a massa do solo nos vasos e umidade medida. Para isso, três vasos contendo 10 kg de solo foram saturados com água e deixados para drenagem até atingir a capacidade de campo. As leituras do sensor foram correlacionadas com a massa dos vasos três vezes ao dia, até que fosse observado massa constante. Com base na umidade medida em laboratório e na massa do solo nos vasos, a umidade real do solo foi calculada pela equação 1:

$$U = \frac{(MU-MS)}{MS} \quad (1)$$

Onde: U= Umidade; MU= massa úmida; MS= massa seca

Quando a umidade desses solos se estabilizou, foram coletadas amostras indeformadas com anel volumétrico para determinação da densidade do solo, que foi 1,17 g cm⁻³, e da umidade pelo método gravimétrico em laboratório, obtendo-se um valor de 15,75%. Além disso, foram estabelecidos os parâmetros de umidade volumétrica para capacidade de campo (CC), com um valor de 18,41% no potencial matricial de -10 KPa, e para o ponto de murcha permanente (PMP), com 7,26% no potencial matricial de -1500 KPa. Com esses valores, a água disponível no solo (AD) foi calculada usando a equação: AD = CC-PMP (CENTURION; ANDRIOLI, 2000).

A partir desses dados de umidade (do sensor e calculada), foi elaborada uma curva de calibração (Figura 2), realizada pelo modelo polinômio e derivada a seguinte equação: $-24,616 * (\text{Leitura do sensor})^3 + 18,362 * (\text{Leitura do sensor})^2 - (3,2793 * \text{Leitura do sensor}) + 0,4328$, obtendo-se ótimo ajuste, R²= 98,7%, para a equação de calibração.

O déficit hídrico teve início aos 62 dias após a emergência. A água disponível no solo dos vasos foi reduzida gradativamente, para próximo de 90% e 80% por seis dias cada um e 70% e 65% por cinco dias cada um. Após esse período, as plantas foram reidratadas gradualmente até atingir próximo de 100% da água disponível durante três dias (Figura 3).

A água era repostada a partir do cálculo de necessidade de água. Nesse caso, como o experimento foi em vaso, era considerado a leitura do sensor que foi previamente calibrado. A partir dessa leitura, o valor da umidade real era encontrado

e o cálculo da necessidade de água era feito considerando a porcentagem de umidade estabelecida, o ponto de murcha permanente e o volume de solo (equação 2).

$$NA = (AD - PM) \times V_{\text{solo}} \quad (2)$$

Onde: NA= necessidade de água; AD= água disponível; PM= ponto de murcha permanente; V_{solo}= volume de solo.

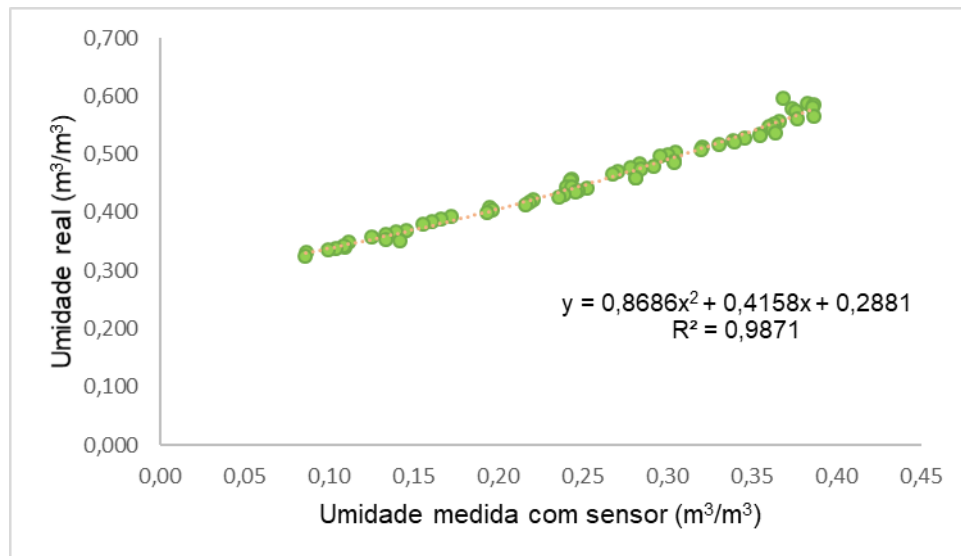


Figura 2. Curva de calibração de umidade do Latossolo Amarelo distrófico, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

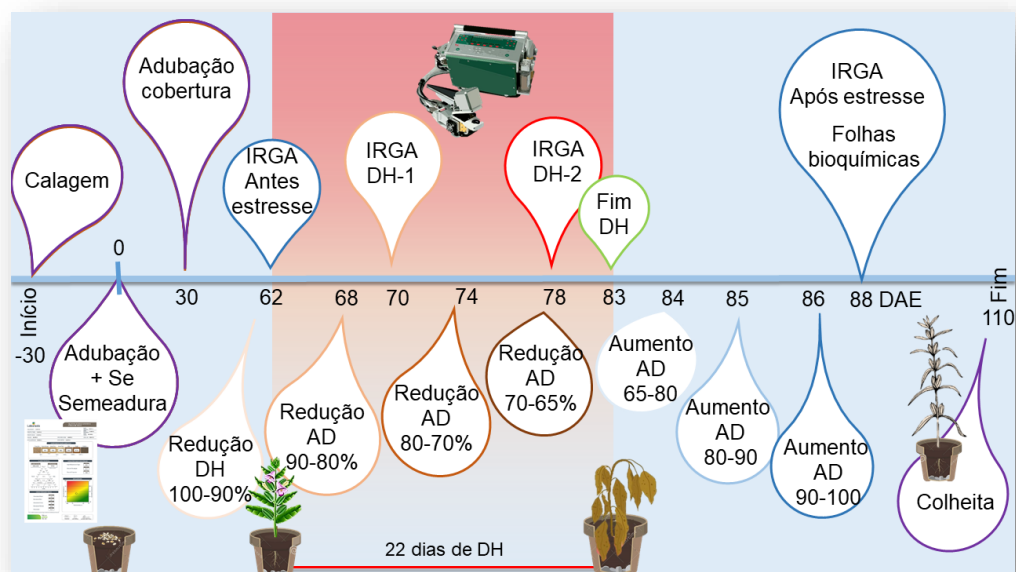


Figura 3. Linha do tempo com os dias após o plantio (DAP) que foram realizadas as principais atividades do experimento, do início ao fim. Lavras, Minas Gerais.

Durante o período em que as plantas estavam sob estresse por déficit hídrico, a umidade do solo foi monitorada continuamente usando o sensor. As medições eram verificadas, principalmente, em três momentos do dia, às 9:00, 13:00 e 18:00 horas, a fim de estimar a quantidade de água necessária para atingir essas porcentagens de água disponível. Nos dias em que a temperatura estava maior, aumentava-se a frequência para manter o padrão pré-estabelecido.

O tratamento controle foi irrigado regularmente durante todo o ciclo da cultura. Ainda, no período da indução do déficit hídrico, as folhas que caíam das plantas eram rigorosamente coletadas e armazenadas em sacos de papel referente a cada tratamento. Ao final desse período, esse material foi seco em estufa de circulação forçada de ar para obtenção da matéria seca.

2.3 Trocas gasosas

Foram realizadas análises de trocas gasosas usando um infravermelho analisador de gases (IRGA) em quatro momentos (Figura 3). Assim, um analisador de gases infravermelho (CIRAS-4) foi utilizado, entre 8h e 11h. Foram avaliados os seguintes parâmetros: taxa fotossintética - A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$), taxa transpiratória - E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática - g_s ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 - C_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol air}^{-1}$) e eficiência do uso da água - WUE ($\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-2} \text{ H}_2\text{O}$). O CO_2 atmosférico dentro da câmara foliar foi mantida a $400 \mu\text{mol CO}_2$ e irradiância de $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. O tempo mínimo pré-estabelecido para a estabilização das leituras foi de 120 s.

2.4 Análises bioquímicas

O material vegetal foi coletado e congelado em nitrogênio líquido e armazenado em ultra freezer -80°C , até o momento das análises. Amostras foliares foram submetidas à extração etanólica, determinando-se, na fração solúvel em etanol, os açúcares redutores e não redutores, aminoácidos solúveis totais, prolina, e teores de pigmentos fotossintéticos (clorofilas *a* e *b*, e carotenóides), enquanto na fração insolúvel (*pellet*) os teores de amido e proteínas. A quantificação dos açúcares redutores foi baseada no emprego do ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), proposto por Miller (1959) e os açúcares solúveis totais pelo método antrona, descrito por Dische (1962). A quantificação de aminoácidos foi realizada pelo método de ninidrina conforme o descrito por Yemm e Cocking (1955). Para quantificação de prolina

seguiu o método descrito por Bates, 1973. Para os teores dos pigmentos fotossintéticos, foi adicionado 120 μL de etanol absoluto a 50 μL do extrato etanólico. O cálculo dos teores de clorofila e carotenoides, expressos em mg g^{-1} MF, foi realizado de acordo com as equações (Equações 3 a 5) propostas por Lichtenthaler (2001):

$$\text{Clorofila a (mg g}^{-1}\text{)} = 13,36 \times A_{663} - 1,28 \times A_{647} \quad (3)$$

$$\text{Clorofila b (mg g}^{-1}\text{)} = 24,43 \times A_{647} - 2,72 \times A_{663} \quad (4)$$

$$\text{Carotenoides (mg g}^{-1}\text{)} = \frac{1000 \times A_{470} - 2,13 \times \text{Clorofila a} - 97,64 \times \text{Clorofila b}}{209} \quad (5)$$

Para a determinação da proteína, o *pellet* da extração etanólica foi ressuspensionado em NaOH (0,1M) e encubado à 80°C por 1h, o sobrenadante resultante foi utilizado para quantificação pelo protocolo Bradford (1976). A extração do amido foi a partir da amostra derivada da extração de proteínas, na qual foi adicionado tampão acetato de potássio, para a acidificação do meio, seguido da adição da solução de degradação (tampão acetato de potássio mais a enzima amiloglicosidade) (adaptado de Hendriks *et al.*, 2003 e Zanandrea *et al* 2010). Para a extração da sacarose foi adicionado hidróxido de potássio (KOH) ao extrato etanólico (1:1). A quantificação do amido e sacarose se deu pelo método antrona (Dische 1962).

Para a avaliação enzimática da dismutase do superóxido (SOD), catalase (CAT), peroxidase do ascorbato (APX) e peroxidase (POD), foram coletados 0.2 g de material fresco, que passaram pelo processo de moagem em nitrogênio líquido com posterior adição de 1.5 mL de uma solução tamponada (0.1 mol L⁻¹ de fosfato de potássio pH = 7.8, 0.1 mol L⁻¹ EDTA pH = 7.0, 0.5 mol L⁻¹, DTT, PMSF 0.1 mol L⁻¹, 1 mmol L⁻¹ de ácido ascórbico, e 22 mg de PVPP) (Biemelt *et al.*, 1998). Logo após isso, a suspensão foi centrifugada a 13.000 g por 10 min a 4 °C e o sobrenadante foi coletado para análise em espectrofotômetro (Epoch-BioTek-Elisa), segundo as metodologias de Giannopolitis e Ries (1977), Havir e Mchale (1987), Nakano e Asada (1981) e Fang e Kao (2000) para SOD, CAT, APX e POD, respectivamente.

Para determinação do conteúdo de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e malondialdeído (MDA), 0.2 g de material fresco foi coletado e macerado em nitrogênio líquido, homogeneizado em 1500 μL de ácido tricloroacético e centrifugado a 12.000 g por 15 minutos a 4 °C. O conteúdo de H₂O₂ foi determinado através da coleta do sobrenadante e em seguida realizada a leitura em absorbância a 390 nm, em meio de

fosfato de potássio 10 mM (pH 7.0), 45 µL do extrato do material vegetal e iodeto de potássio 1M (VELIKOVA et al., 2000).

A quantificação de MDA foi realizada seguindo a metodologia de Buege e Aust (1978). Para isso, 125 µL do sobrenadante da extração foi coletado e pipetado em um microtubo de 1500 µL, que continha 250 µL do seguinte meio de reação: ácido tiobarbitúrico (TBA) 0.5% e ácido tricloroacético (TCA) 10%. Posteriormente, os microtubos foram levados a banho-maria a 95 °C por 30 minutos e, após isso, a reação foi cessada em recipiente contendo gelo. Em seguida 350 µL do meio reacional foi coletado e pipetado em microplacas e realizada a leitura em espectrômetro a 535 e a 600 nm. A quantificação de malondealdeído (MDA) foi quantificada de acordo com a seguinte equação (equação 6). A peroxidação lipídica foi expressa em nmol (MDA) g⁻¹ de matéria fresca.

$$[\text{MDA}] = \frac{A_{535} - A_{600}}{\xi \cdot b} \quad (6)$$

Em que: ξ (coeficiente de extinção molar = $1.56 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$) e b: (comprimento ótico = 1).

A leitura da absorbância das amostras, com comprimento de onda definido de acordo com cada protocolo citado anteriormente, foi feita utilizando-se um leitor de microplacas de 96 poços, com a interface do software Skanlt RE 9.0.2.

2.5 Amostragem, colheita e produção

A colheita foi realizada aos 110 DAS. As plantas foram cortadas rente ao solo, separadas em parte aérea (folhas que caíram durante o déficit hídrico + o restante da parte aérea), grãos e raízes, que foram lavadas para retirar o solo. Em seguida foram armazenadas em sacos de papel e colocadas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até atingir peso constante (± 72 horas). Posteriormente, pesou-se o material para aferir a matéria seca da parte aérea, grãos e raízes.

Os pesos dos grãos secos foram corrigidos para 6% de umidade para obtenção da produção. Como haviam duas plantas por unidade experimental, o valor médio das duas plantas foi utilizado para os demais cálculos. Em seguida, a parte aérea foi moída em moinho tipo Willey e submetida a análises químicas para determinação elementar.

2.6 Procedimento de digestão da amostra para análises elementares

Os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn foram determinados conforme metodologia descrita por Malavolta et al. (1997). O teor total de Se nas amostras de parte aérea e grãos de gergelim foi determinado após digestão ácida (BENEDITO et al., 2025), com adaptações.

Para isso, foi pesado 0,1 g de cada amostra da parte aérea e grão, em tubos de digestão TFM®, foi adicionado 1 mL de ácido nítrico (HNO_3) concentrado destilado, essa mistura foi deixada em temperatura ambiente por 15 horas como pré-digestão.

Posteriormente, 2 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 30% (v/v) foi adicionado aos frascos. Os recipientes foram tampados e inseridos no forno micro-ondas, as amostras foram aquecidas em uma rampa de temperatura até 175 °C por 10 min seguida por um tempo de espera de 10 minutos.

As amostras digeridas foram deixadas em temperatura ambiente e após resfriamento foram transferidas para tubos de centrífuga e completadas para o volume de 10 ml com água ultrapura. Para validar a eficiência da digestão e o método de quantificação de Se, foi utilizado um material de referência certificado (BCR 402, White Clover, Institute for Reference Materials and Measurements, Bélgica).

2.7 Determinação dos elementos

O N foi determinado a partir da destilação pelo método Kjeldahl (MARAVOLTA et al, 1997). Os demais nutrientes foram lidos em espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) (Spectro, modelo Blue, Alemanha) com correção de fundo. O Se foi determinado por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS, Perkin Elmer, NexION 2000) com acidez final e teor de sólidos dissolvidos aceitáveis.

De posse dos teores de nutrientes e Se, foi calculado o acúmulo de nutrientes na parte aérea e grãos de gergelim multiplicando-se os teores dos elementos pela matéria seca de seus respectivos particionamentos da planta, macronutrientes (mg planta^{-1}), micronutrientes e Se ($\mu\text{g planta}^{-1}$).

2.8 Análise estatística

As suposições de independência, homocedasticidade e normalidade foram verificadas a partir dos gráficos dos resíduos e utilizando o pacote gvlma (PEÑA; SLATE, 2006). Para garantir que todas essas suposições fossem atendidas, quando necessário, os resultados dos dados foram transformados para a escala logarítmica

natural. A análise de variância (ANOVA) foi realizada pelo teste F e, quando significativo, as médias foram comparadas por meio do teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Todas as análises e os gráficos foram realizadas no software R versão 4.3.0 (R Development Core Team, 2023).

3. RESULTADOS

Não houve interações ($p \leq 0,05$) entre os fatores estudados (fontes de Se e manejo hídrico) para a variável abscisão foliar (Figura 4a). O tratamento sob déficit hídrico obteve os maiores resultados, sendo estatisticamente superior ao tratamento irrigado, pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). As fontes blend e orgânica obtiveram os maiores resultados, sendo estatisticamente diferente do tratamento controle e mineral, que tiveram menor quantidade de folhas caídas.

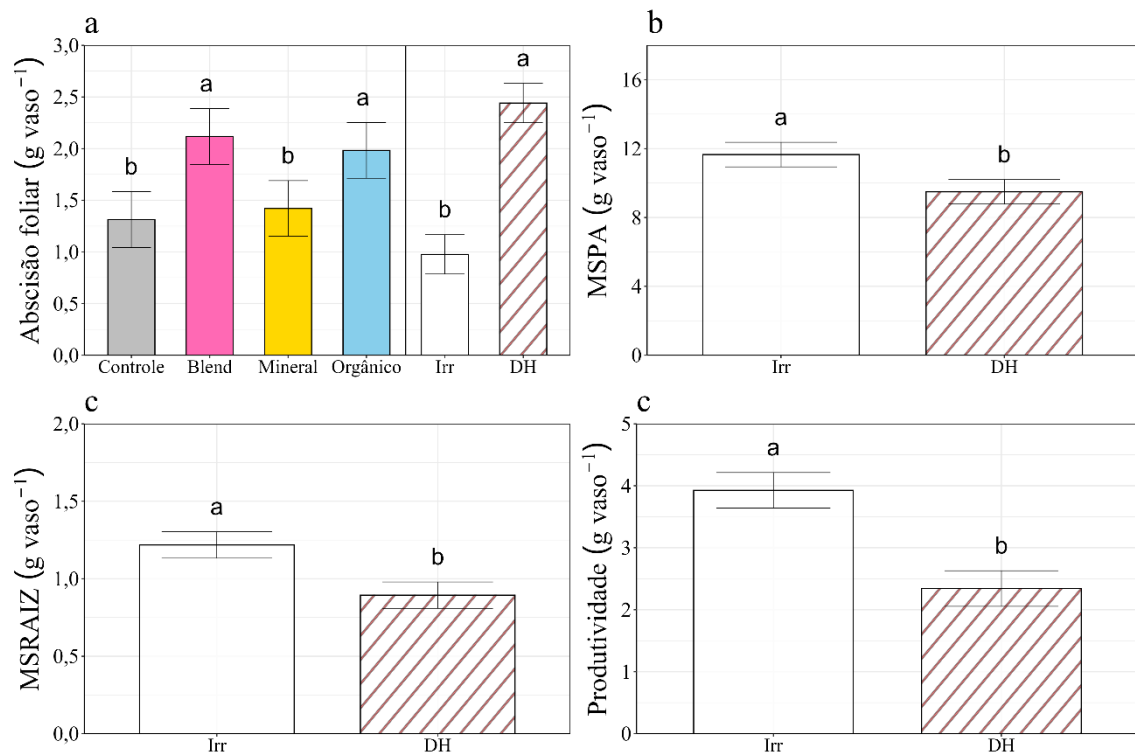


Figura 4. Abscisão foliar durante o período do déficit hídrico (a), matéria seca da parte aérea (MSPA) (b), matéria seca de raiz (MSRAIZ) (c) e produtividade (d) cultivado com diferentes fontes de selênio, irrigado (Irr) e em déficit hídrico (DH). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Lavras, Minas Gerais, Brasil.

As variáveis matéria seca de parte aérea, de raiz e produção foram alteradas em função do manejo hídrico (Figura 4b,c,d), sem diferenças observadas em relação às fontes utilizadas ($p \leq 0,05$). Houve redução na produção de matéria seca da parte aérea, de raiz e produtividade nos tratamentos que foram submetidos ao déficit hídrico.

O déficit hídrico modificou significativamente ($p \leq 0,05$) o comportamento das trocas gasosas, independentemente da fonte de Se adicionada no solo. Mais especificamente, houve redução na taxa fotossintética (A), taxa de transpiração (E),

condutância estomática (g_s) e a eficiência do uso da água (EUA) (Figura 5a-2, a-3, b-2, b-3, c-2, c-3, e-3).

A concentração interna de CO_2 (C_i), nesse experimento, não foi afetada pelo manejo e aplicação de Se (Figura 5d), considerados estatisticamente iguais em todas as leituras. As fontes de Se utilizadas mostram resultados significativos antes da indução do déficit hídrico para A , E e g_s (Figura 5a-1, b-1, c-1). A fonte blend mostrou-se superior às demais, sobretudo na g_s , estatisticamente superior a todas as outras, incluindo o controle.

Durante o estresse moderado (*Estresse_mod*), a fonte mineral foi significativamente ($p \leq 0,05$) superior às demais para as variáveis A , E e g_s . Ainda, nos tratamentos que não foram induzidos ao déficit hídrico, a fonte blend teve destaque, sendo superior às demais, incluindo o controle (Figura 5a-2, b-2 e c-2). E durante o déficit hídrico severo (*Estresse_sev*), os resultados variaram sem padrão conclusivo. Porém, as fontes mineral e orgânica, foram estatisticamente inferiores ao tratamento controle nas variáveis A e EUA (Figuras 5a-3, e-3).

Observou-se que, onde não houve indução do déficit hídrico, antes e durante o estresse, a aplicação de Se foi superior ao controle para A , E , g_s (Figura 5a-2, a-3, b-2, c-1, c-2). Ademais, após a reidratação, a aplicação de Se, sobretudo com a fonte mineral, mostrou-se superior estatisticamente ao controle na taxa fotossintética e taxa transpiratória, para as plantas que foram induzidas ao déficit hídrico (Figura 5a-4, b-4).

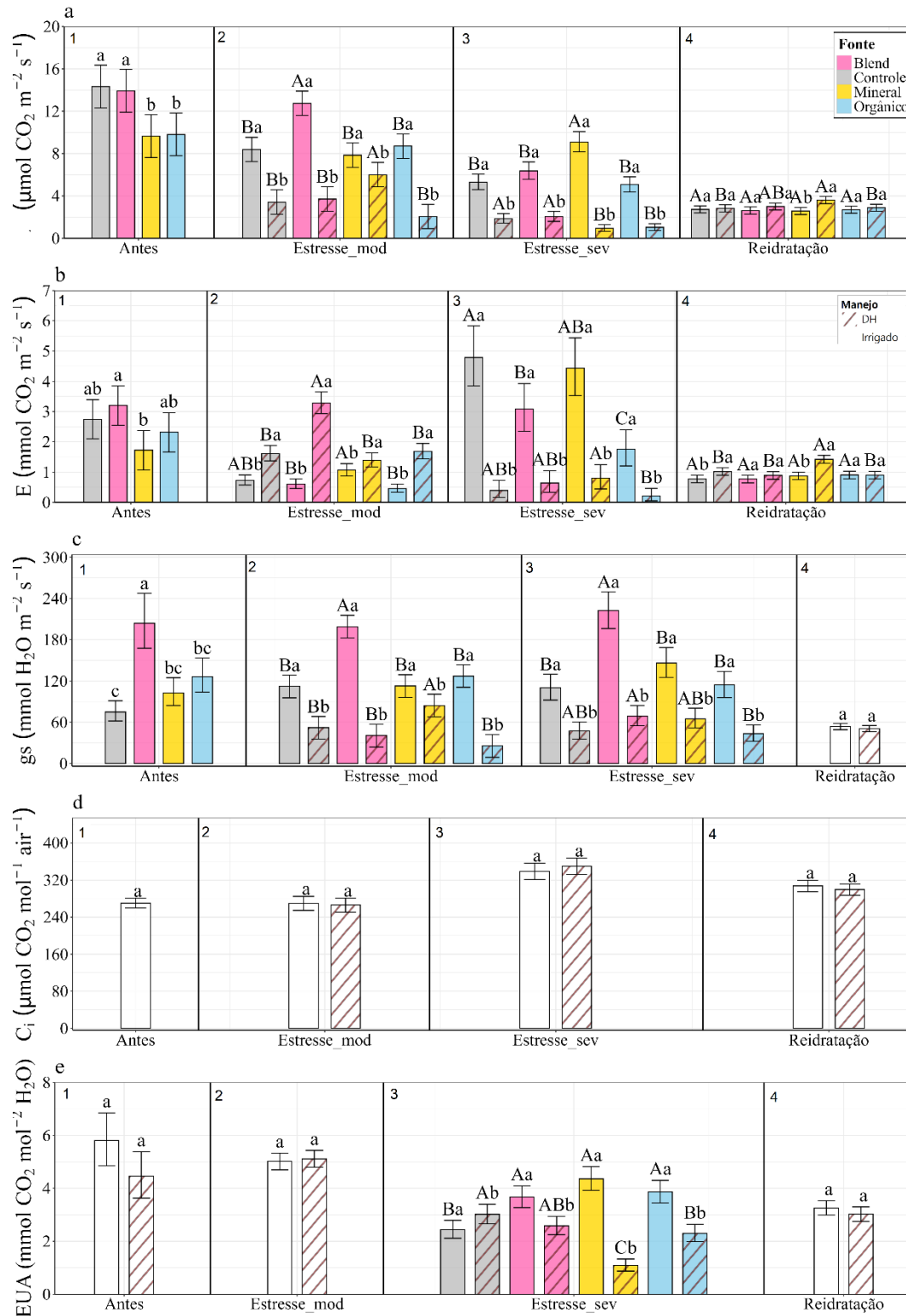


Figura 5. Taxa fotossintética - *A* (a), Taxa transpiratória - *E* (b), condutância estomática - *g_s* (c), concentração interna de CO₂ – *C_i* (d), eficiência do uso da água – WUE (e) nas folhas de gergelim em quatro momentos distintos de manejo hídrico: antes do estresse (62 DAE); durante déficit hídrico moderado - Estresse_mod 1(70 DAE); durante o estresse severo - Estresse_sev (78 DAE); Reidratação (84 DAE). Médias seguidas pela mesma letra não

diferem estatisticamente. Quando houve interação, as médias seguidas de letras minúsculas representam o manejo dentro da fonte; e letras maiúsculas representam a fonte dentro do manejo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Lavras, Minas Gerais, Brasil.

A atividade específica das enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX) e peroxidase (POD) nas folhas de gergelim foi alterada significativamente pelo manejo hídrico e pela adição de Se, havendo interação ($p \leq 0,05$) entre os fatores estudados (fonte e manejo) (Figura 5a, b, c, d).

Pode-se observar que, na maioria dos casos, ao aplicar Se, houve aumentos significativos na atividade das enzimas para o manejo com déficit hídrico. A atividade da SOD, no manejo déficit hídrico, foi maior quando adicionado Se, para as fontes blend e orgânica, representando diferenças de 128 e 99% comparado ao controle (68 U SOD $\text{min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ proteína), respectivamente, (Figura 5a).

A atividade da CAT também apresentou incrementos de 51 e 75%, para as fontes blend e mineral, respectivamente, no déficit hídrico, comparadas ao controle (0,35 $\text{mmol H}_2\text{O mg proteína}^{-1} \text{min}^{-1}$). Já a fonte orgânica, apresentou comportamento oposto comparada às outras fontes ($p \leq 0,05$), com maior valor observado no tratamento irrigado, comparado ao controle (Figura 6b).

Na atividade da APX é possível observar que todas as fontes foram afetadas pelo manejo (Figura 5c) ($p \leq 0,05$), com os tratamentos sob déficit hídrico apresentando os maiores valores. A aplicação das fontes Se mostrou-se superior ao controle (2,42 $\text{nmol ASA mg proteína}^{-1} \text{min}^{-1}$) para o manejo com déficit hídrico, com incrementos de 38, 31 e 21%, respectivamente, para as fontes blend, mineral e orgânica.

O manejo não alterou a atividade da POD no tratamentos controle com déficit hídrico e controle irrigado, 0,83 e 0,54 $\text{nmol tetraguaiacol mg MF}^{-1} \text{min}^{-1}$, respectivamente. No entanto, os resultados mostraram aumentos significativos no conteúdo das enzimas nas folhas de gergelim sob déficit hídrico nos tratamentos que receberam aplicação de Se. Nesse caso, a fonte blend se destacou, seguida pela mineral e orgânica, com valores correspondendo a 303, 215 e 134%, respectivamente, em comparação ao controle no manejo sob déficit hídrico (Figura 6d).

Adicionalmente, o conteúdo de proteínas nas folhas de gergelim foi impactado negativamente pelo déficit hídrico, exceto na fonte orgânica, com manejos considerados estatisticamente iguais ($p \leq 0,05$). A maior redução observada entre os

manejos foi na fonte blend, 167%. Entretanto, no manejo irrigado, essa fonte obteve o maior valor, 224 mg proteína g⁻¹ MF, e superior estatisticamente à fonte orgânica, 154 mg proteína g⁻¹ MF (Figura 6e).

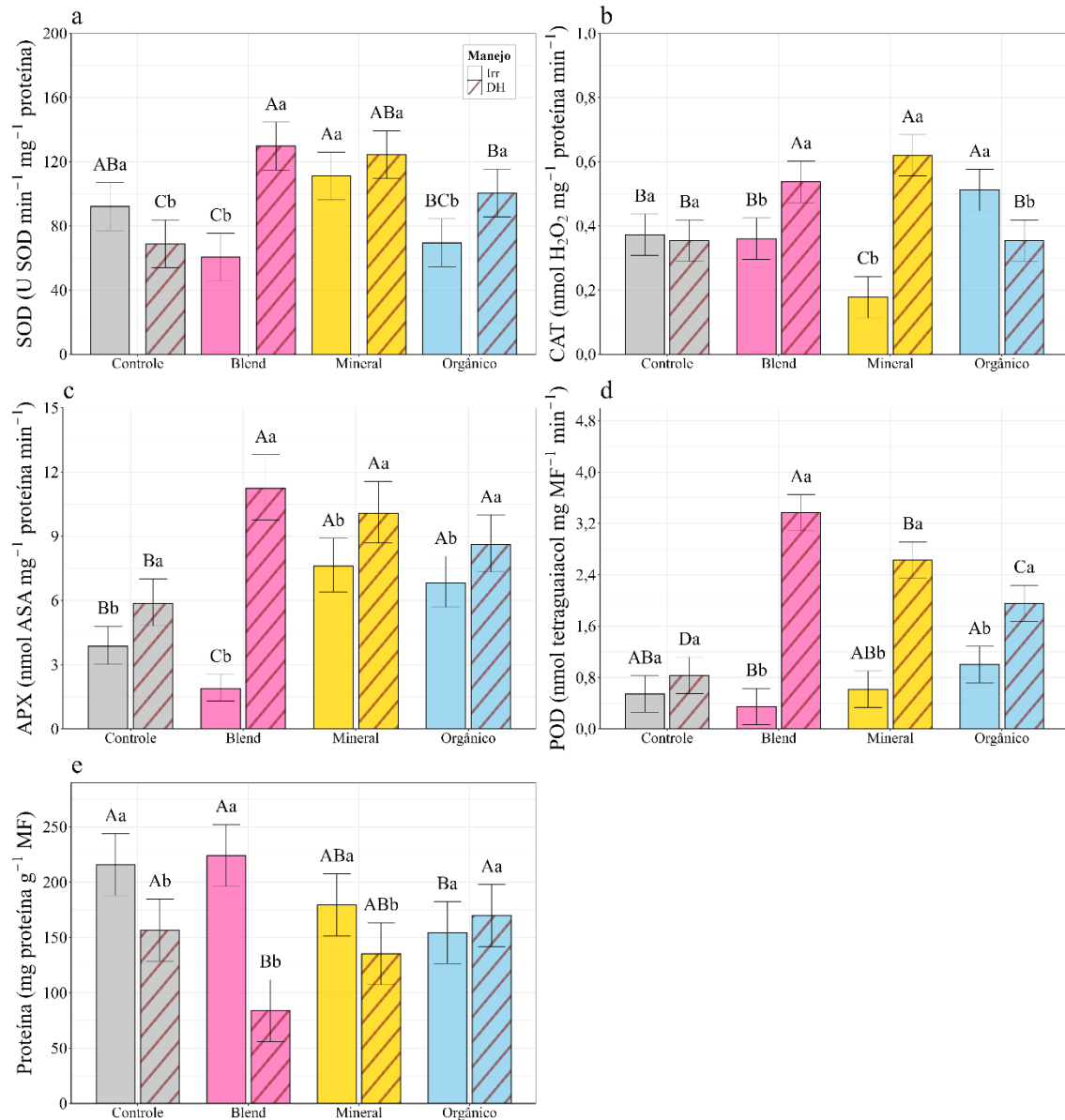


Figura 6. Superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX), peroxidase (POD) e proteínas de folhas frescas gergelim cultivado sob fontes de selênio em um latossolo amarelo irrigado e em déficit hídrico. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente. Quando houve interação, as médias seguidas de letras minúsculas representam o manejo dentro da fonte; e letras maiúsculas representam a fonte dentro do manejo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Lavras, Minas Gerais, Brasil.

O conteúdo de açúcares solúveis totais (AST) pelos fatores estudados ($p \leq 0,05$) sem interações entre eles (Figura 7a, e, d). Quanto ao fator fontes, o tratamento bled foi inferior estatisticamente ao controle e mineral. E dentro do manejo, o

tratamento irrigado obteve o maior valor diferindo estatisticamente do manejo sob déficit hídrico.

Para amido, aminoácidos, compostos fenólicos, clorofilas *a* e *b*, carotenoides e prolina, foram observadas interações ($p \leq 0,05$) entre os fatores, mostrando que ambos os fatores têm grande importância no comportamento dessas variáveis (Figuras 7b, c, d, g, h, i, j).

A aplicação de Se teve influência no acúmulo de amido e prolina dentro do manejo, ou seja, em condição de déficit hídrico, quando aplicado Se, houve a manutenção do acúmulo dessas substâncias nas folhas de gergelim ($p \leq 0,05$) (Figura 7b, j). No tratamento controle de ambos, sob déficit hídrico, houve redução do acúmulo.

Considerando o manejo, o comportamento das variáveis aminoácidos e clorofila *b* foram estatisticamente diferentes para as fontes blend e controle ($p \leq 0,05$) (Figura 7c, h). Para ambos, na fonte blend, houve maior acúmulo sob déficit hídrico, sendo de 15 e 46%, respectivamente. E no controle os maiores resultados foram observados no manejo irrigado, com 42 e 30%, respectivamente.

Sob déficit hídrico, o conteúdo de aminoácidos foi maior quando utilizada a fonte blend (11,70 nmol aa g⁻¹ MF), apresentando resultado estatisticamente superior ao controle (7,63 nmol aa g⁻¹ MF) e a fonte orgânica (5,55 nmol aa g⁻¹ MF). Entretanto, no manejo irrigado, o tratamento controle se mostrou superior quando utilizadas as fontes blend e orgânica (Figura 7c).

O conteúdo de compostos fenólicos foi alterado com manejo hídrico, apresentando diferenças estatísticas para as fontes blend e orgânica (Figura 7d). Para a blend, o manejo irrigado foi superior (527 mg ácido gálico g⁻¹ MF) ao contrário da fonte orgânica, que nesse mesmo manejo, foi estatisticamente inferior (357 mg ácido gálico g⁻¹ MF). Ainda, observa-se superioridade da fonte blend comparada as demais fontes com Se no manejo irrigado.

O conteúdo de MDA foi estatisticamente diferente dentro do fator fonte. O tratamento controle apresentou o maior valor (70 nmol MDA g⁻¹ MF), sendo estatisticamente superior às fontes blend e orgânica e estatisticamente semelhante à fonte mineral (Figura 7e). O conteúdo de H₂O₂ não apresentou diferenças estatísticas, independente da fonte e manejo, com valores entre 60,75 e 50,13 nmol H₂O₂ g⁻¹ MF (Figura 7f).

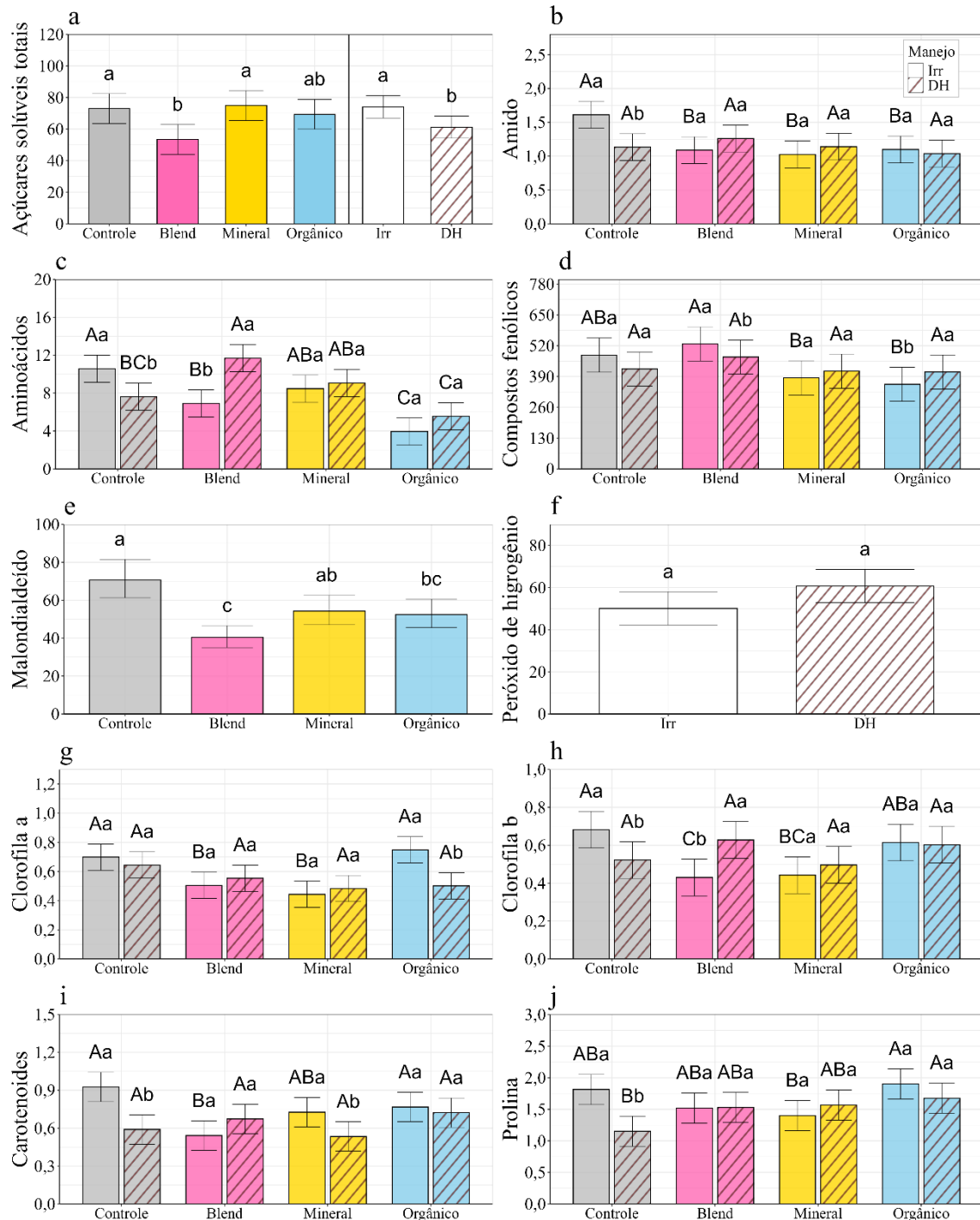


Figura 7. Açúcares solúveis totais (μmol de glicose g^{-1} de matéria fresca) (a), amido (μmol de glicose g^{-1} de fresca) (b), aminoácidos (mmol de aminoácido g^{-1} de fresca) (c), compostos fenólicos (mg de ácido gálico g^{-1} de fresca) (d), malondialdeído (nmol de malondialdeído g^{-1} de fresca) (e), peróxido de hidrogênio (nmol de H_2O_2 g^{-1} de matéria fresca) (f), clorofila a (mg mL^{-1} de clorofila a g^{-1} de matéria fresca) (g), clorofila b (mg mL^{-1} de clorofila b g^{-1} de matéria fresca) (h), carotenoides (mg mL^{-1} de carotenóides g^{-1} de matéria fresca) (i) e prolina (μmol de prolina g^{-1} de matéria fresca) (j) em folhas de gergelim cultivado com diferentes fontes de selênio, irrigado e em déficit hídrico. Médias seguidas pela mesma letra não diferem

estatisticamente. Quando houve interação, as médias seguidas de letras minúsculas representam o manejo dentro da fonte; e letras maiúsculas representam a fonte dentro do manejo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Lavras, Minas Gerais, Brasil.

Na variável clorofila a, dentro do manejo, observou-se diferenças apenas para fonte orgânica, com o déficit hídrico apresentando redução de 49%, comparado ao irrigado (Figura 7g). O conteúdo de carotenoides também foi influenciado pelo manejo, havendo diferenças estatísticas para o controle e a fonte mineral, em que o manejo irrigado foi superior ($p \leq 0,05$). Mas a aplicação de Se parece reduzir a degradação desses pigmentos quando aplicado Se a partir das fontes, blend e orgânica, quando em déficit hídrico (Figura 7i).

Não houve interações entre os fatores no acúmulo e teor de Se na parte aérea do gergelim, mas foram observadas diferenças quando se comparam as fontes. Nesse caso, blend e mineral se destacaram, sendo estatisticamente superiores aos demais tratamentos, acumulando em média 9,88 e 11,27 vezes mais que a fonte orgânica, respectivamente (Figura 8a e b).

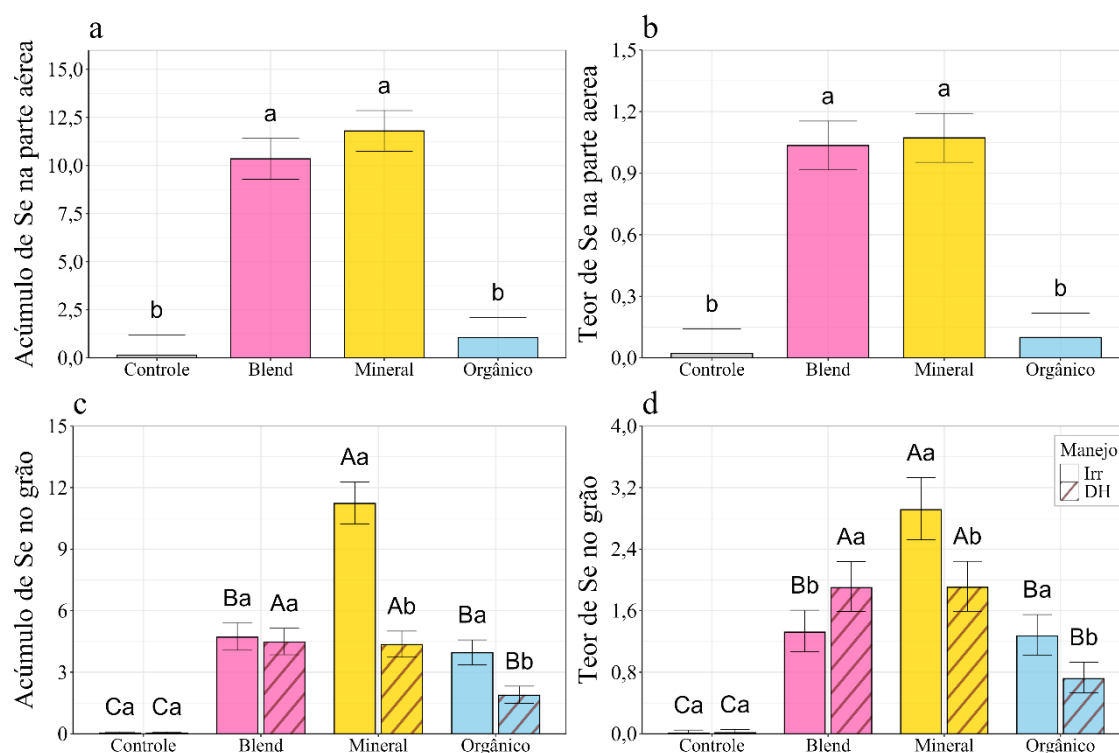


Figura 8. Acúmulo de Se na parte aérea ($\mu\text{g planta}^{-1}$) (a), teor de Se na parte aérea (mg kg^{-1}) (b), Acúmulo de Se nos grãos ($\mu\text{g planta}^{-1}$) (c) e teor de Se nos grãos (mg kg^{-1}) (d) de gergelim cultivado com diferentes fontes de selênio, irrigado e em déficit hídrico. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente. Quando houve interação, as médias seguidas de

letras minúsculas representam o manejo dentro da fonte; e letras maiúsculas representam a fonte dentro do manejo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Lavras, Minas Gerais, Brasil.

Foi observado interação entre os fatores, fonte e manejo ($p \leq 0,05$), ao observar o acúmulo de Se no grão, com o déficit hídrico influenciando o acúmulo do elemento (Figura 8 c). Nesse caso, para as fontes mineral e orgânica, observa-se que sob déficit hídrico há redução no valor acumulado, em torno de 37 e 30%, respectivamente.

Independente do manejo, é possível observar que há incremento no acúmulo de Se no grão, qualquer que seja a fonte de Se aplicada. Para as fontes blend e mineral, esse valor foi de 54 e 52% maior que o da fonte orgânica, no tratamento que teve déficit hídrico. Ainda, observando o tratamento irrigado, houve superioridade da fonte mineral, apresentando o maior valor acumulado $3,35 \mu\text{g planta}^{-1}$ (Figura 8c).

O teor de Se no grão também foi influenciado pelo manejo e fonte aplicada (Figura 8 d). Nesse caso, a fonte blend sob déficit hídrico foi superior ao manejo irrigado, apresentando comportamento contrário às fontes mineral e orgânica, que sob déficit hídrico foi estatisticamente inferior ao manejo irrigado.

Também foi possível observar incrementos nos teores de Se nos grãos independente da fonte de Se utilizada, com a fonte mineral apresentando superioridade às demais no manejo irrigado. E dentro do manejo sob déficit hídrico, as fontes blend e mineral sendo estatisticamente superiores a fonte orgânica.

O acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas de gergelim foi significativo apenas para Ca e Cu, Figuras 9a e b, respectivamente. Nesse caso, não houve interações entre os fatores, com significância apenas para o fator fonte. O acúmulo de Ca mostrou diferenças significativas apenas entre os tratamentos controle ($165 \text{ mg planta}^{-1}$) e a fonte orgânica ($121 \text{ mg planta}^{-1}$). E o acúmulo de Cu, apenas entre as fontes mineral ($46 \mu\text{g planta}^{-1}$) e orgânica ($33 \mu\text{g planta}^{-1}$). Dados não apresentados dos demais nutrientes estão nas tabelas 3 e 4 - Apêndice.

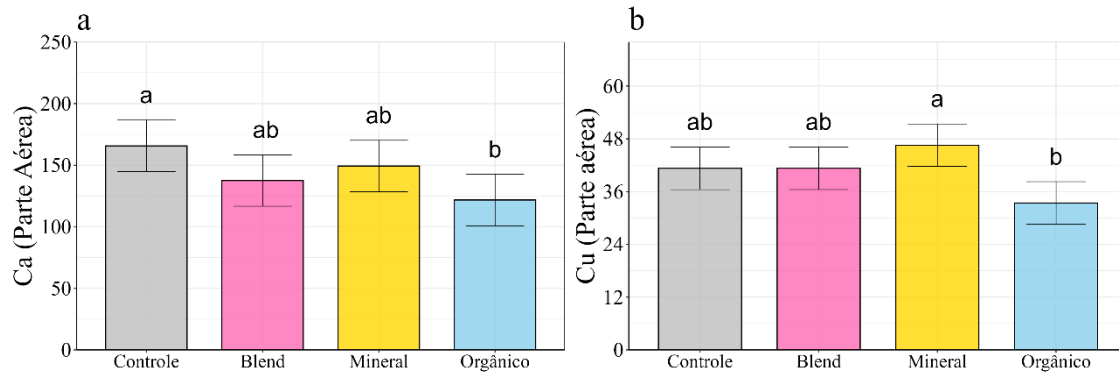


Figura 9. Acúmulo de cálcio (mg planta^{-1}) (a) e cobre ($\mu\text{g planta}^{-1}$) (b) na parte aérea de gergelim cultivado com diferentes fontes de selênio, irrigado e em déficit hídrico. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Lavras, Minas Gerais, Brasil.

Não foram observadas interação entre os fatores ($p \leq 0,05$) para acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S no grão. Mas o fator manejo teve diferenças estatísticas para essas variáveis, onde os acúmulos do manejo com déficit hídrico foi inferior ao manejo irrigado, representando redução de 40, 42, 30, 50, 38 e 37% no acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente, nos grãos de gergelim (Figuras 10a, b, c, d, e, f).

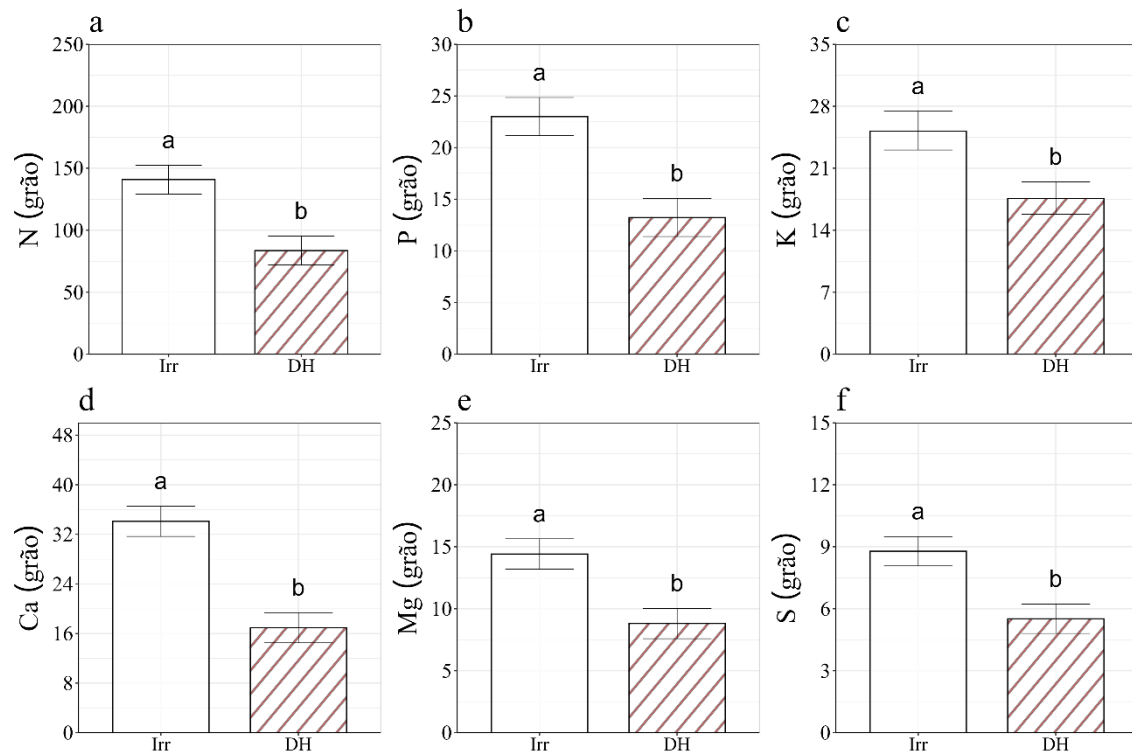


Figura 10. Acúmulo de nitrogênio (mg planta^{-1}) (a), fósforo (mg planta^{-1}) (b), potássio (mg planta^{-1}) (c), cálcio (mg planta^{-1}) (d), magnésio (mg planta^{-1}) (e) e enxofre (mg planta^{-1}) (e) nos grãos de gergelim cultivado com diferentes fontes de selênio, irrigado e em déficit hídrico.

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente. Quando houve interação, as médias seguidas de letras minúsculas representam o manejo dentro da fonte; e letras maiúsculas representam a fonte dentro do manejo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Lavras, Minas Gerais, Brasil.

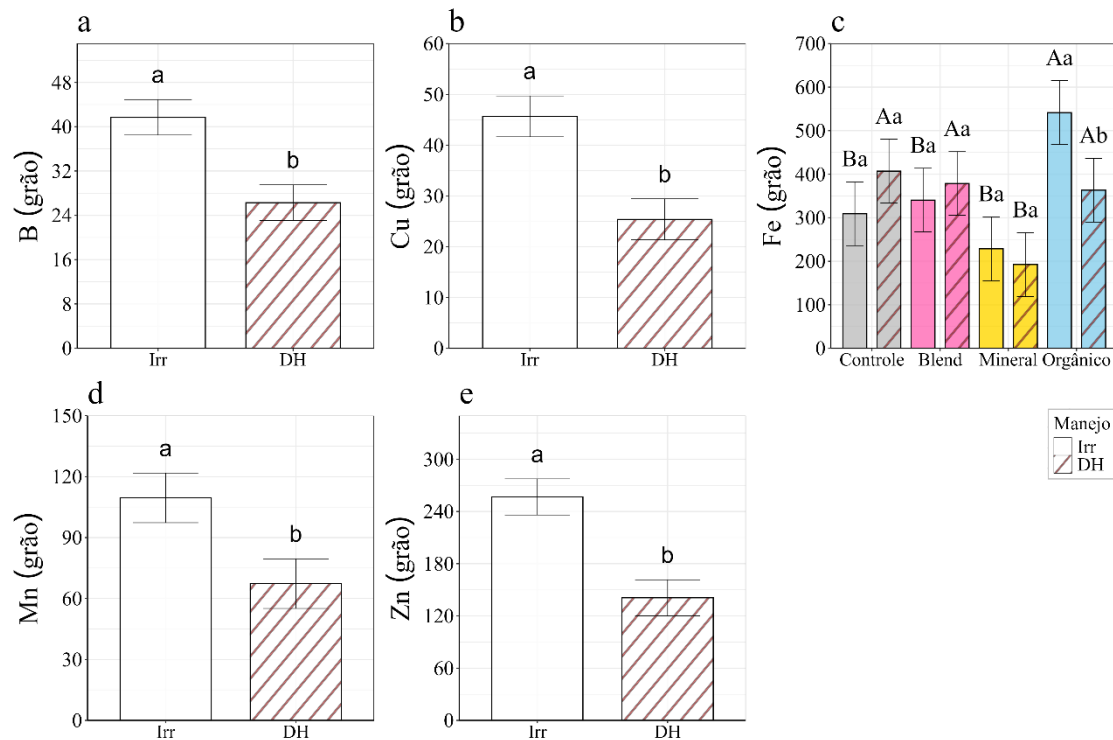


Figura 11. Acúmulo de boro ($\mu\text{g planta}^{-1}$) (a), cobre ($\mu\text{g planta}^{-1}$) (b), ferro ($\mu\text{g planta}^{-1}$) (c), manganês ($\mu\text{g planta}^{-1}$) (d) e zinco ($\mu\text{g planta}^{-1}$) (e) nos grãos de gergelim cultivado com diferentes fontes de selênio, irrigado e em déficit hídrico. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente. Quando houve interação, as médias seguidas de letras minúsculas representam o manejo dentro da fonte; e letras maiúsculas representam a fonte dentro do manejo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Lavras, Minas Gerais, Brasil.

De forma semelhante, também houve redução no acúmulo dos micronutrientes B, Cu, Mn e Zn no manejo sob déficit hídrico quando comparado ao irrigado, com valores representando 36, 44, 38 e 45%, respectivamente. Para o micronutriente Fe, houve interação entre os fatores estudados ($p \leq 0,05$).

O manejo afetou o acúmulo apenas quando utilizada a fonte orgânica, sendo que o déficit hídrico ($363 \mu\text{g planta}^{-1}$) acumulou menos Fe que o irrigado ($441 \mu\text{g planta}^{-1}$) (Figura 11c). Ao observar a interferência das fontes no acúmulo, especificamente para o manejo irrigado, percebe-se inferioridade da fonte mineral ($192 \mu\text{g planta}^{-1}$) comparada as demais, incluindo o controle ($407 \mu\text{g planta}^{-1}$).

A análise de componentes principais (Figura 12) revela que a PCA 1 e PCA 2 representam 62,25% do total da variância dos dados. É possível afirmar que a atividade das enzimas foi maior em condição de déficit hídrico, assim como o conteúdo de malondialdeído. E quando as plantas foram irrigadas o acúmulo de nutrientes nos grãos, o conteúdo de carotenoides, proteínas, açúcares solúveis totais e as trocas gasosas nas folhas foram mais elevados.

O acúmulo de Se na parte aérea não foi tão expressivo entre os manejos, mas é possível observar que o acúmulo de Se nos grãos tende a ser maior quando em manejo irrigado. Além disso, a atividade das enzimas antioxidantes foi maior quando aplicado Se, além de maior acúmulo dos nutrientes nos grãos e maiores valores de trocas gasosas.

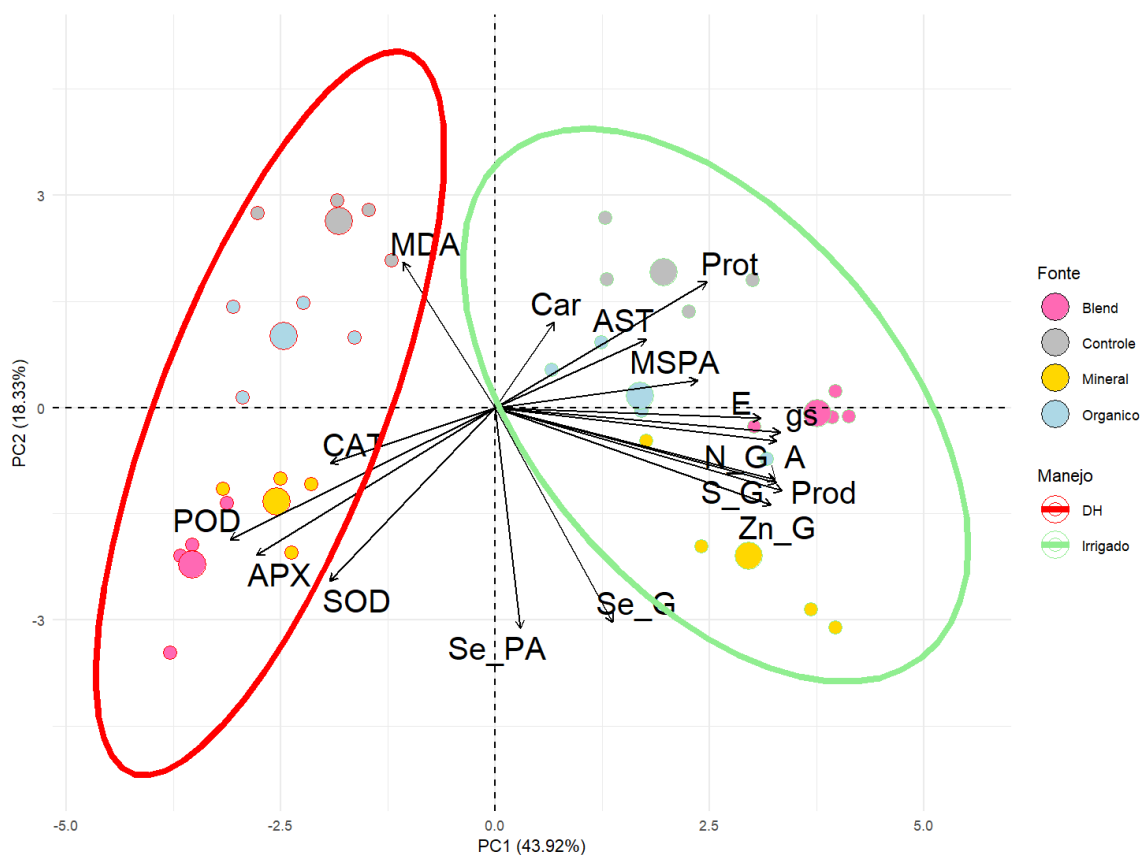


Figura 12. Análise de componentes principais (PCA) de gergelim cultivado com diferentes fontes de selênio, irrigado e em déficit hídrico. Malondialdeído (MDA), catalase (CAT), peroxidase (POD), ascorbato peroxidase (APX), superóxido dismutase (SOD), selênio na parte aérea (Se_PA), selênio do grão (Se_G), carotenoides (Car), açúcares solúveis totais (AST), proteínas (Prot), matéria seca da parte aérea (MSPA), produção (Prod), taxa fotossintética (A), taxa transpiratória (E) e condutância estomática (gs) no déficit hídrico

moderado, nitrogênio no grão (N_G), enxofre no grão (S_G) e zinco no grão (Zn_G) no grão. Lavras, Minas Gerais, Brasil.

4. DISCUSSÃO

A capacidade da planta em tolerar a seca é um processo complexo e envolve vários mecanismos moleculares, bioquímicos, fisiológicos e nutricionais que interagem para minimizar os danos causados pelo déficit hídrico. Nesse estudo, foram utilizadas duas fontes de Se (mineral e orgânica), e a combinação entre elas, denominada de blend, para avaliar a influência na redução dos danos causados pelo déficit hídrico.

A senescência prematura das folhas é uma das primeiras respostas ao estresse hídrico, resultando na redução da superfície foliar para minimizar a perda de água por transpiração. Esse mecanismo ocorre devido à sinalização hormonal que estimula a síntese de ácido abscísico (ABA), um regulador essencial na resposta ao déficit hídrico (WAADT et al., 2022). Estudos mostram que o ABA promove o fechamento estomático para reduzir a perda de água e pode estimular a senescência foliar, levando à queda precoce das folhas como estratégia de sobrevivência (ZHAO et al., 2017).

Outro efeito observado em situações de seca prolongada é a redução do crescimento vegetal, que, dependendo do tempo de exposição e da severidade do estresse, pode comprometer a produção de biomassa e, consequentemente, a produtividade da cultura. Isso acontece porque a água está diretamente relacionada com a multiplicação das células vegetais, na falta dela, a planta cessa o crescimento e prioriza outras funções importantes de sobrevivência (AKHTER ANSARI et al., 2019).

Apesar da aplicação de Se, neste estudo, os impactos negativos da seca foram irreversíveis, indicando que sua ação como antioxidante pode ter atenuado os danos celulares, mas não foi suficiente para impedir as perdas na produção de biomassa e produtividade dos grãos. Esse resultado corrobora com os observados por outros autores, que concluíram que a aplicação do Se não conseguiu mitigar as perdas na produção em condição de estresse prolongado (CHAUHAN et al., 2019; VEGARAVELLO et al., 2023).

Embora alguns estudos tenham mostrado que o déficit hídrico induz o crescimento radicular para aumentar a captação de água em profundidade (BAO et al., 2014; OROSA-PUENTE et al., 2018), neste experimento, essa resposta não foi observada. Pelo contrário, os resultados indicaram que a seca causou uma redução

significativa na biomassa radicular, prejudicando a eficiência na absorção de água e nutrientes.

As respostas da planta ao estresse hídrico envolvem ajustes fisiológicos para minimizar perdas e otimizar a sobrevivência. Uma dessas respostas é a redução da condutância estomática (g_s), que diminui a transpiração (E) e reduz a entrada de CO_2 , impactando a taxa fotossintética (A) (AKHTER ANSARI et al., 2019). Neste estudo, observou-se que, sob déficit hídrico moderado, a aplicação de Se foi benéfica, atenuando as quedas em A , E e g_s em comparação ao controle, permitindo uma resposta mais equilibrada ao estresse.

Embora o fechamento dos estômatos limite a absorção de CO_2 , a concentração interna do gás permaneceu estável durante o período de estresse, isso também foi relatado por (DA SILVA et al., 2020; MAFAKHERI et al., 2010). O fato pode estar relacionado à desaceleração do metabolismo fotossintético, em que a planta, mesmo tendo CO_2 disponível, não consegue utilizá-lo de forma eficiente devido a limitações bioquímicas na atividade da Rubisco e no Ciclo de Calvin. Além disso, pode haver pequena difusão de CO_2 pelos estômatos parcialmente fechados, garantindo a manutenção da concentração interna (TAIZ et al., 2017).

A recuperação das plantas após a reidratação foi mais eficiente nos tratamentos que receberam Se, notadamente na fonte mineral. Essa resposta pode estar relacionada à atuação do Se na preservação da integridade celular e no restabelecimento de processos metabólicos essenciais, como a atividade enzimática antioxidante, a regulação estomática e a retomada da fotossíntese (DOS SANTOS et al., 2024).

Esse efeito positivo pode ser reflexo da maior atividade das enzimas SOD, CAT, APX e POD nos tratamentos com Se, mostrando um papel essencial na neutralização das espécies reativas de oxigênio (EROs) (LANZA; REIS, 2021). A SOD é a primeira na linha de atuação, convertendo o radical superóxido (O_2^-) em peróxido de hidrogênio (H_2O_2) (MIRJAHANMARDI; EHSANZADEH, 2016; SZÓLLÓSI, 2014).

Em seguida, CAT, APX e POD atua degradando o (H_2O_2) e impede que ele seja convertido em radicais hidroxila (CAVERZAN et al., 2012). Diversos estudos que avaliaram a aplicação de Se na mitigação dos danos causados por estresses ambientais relatam o aumento da atividade enzimática quando aplicado Se nas culturas, como tomate (ALVES et al., 2020), arroz (ANDRADE et al., 2018; CABRAL

GOUVEIA et al., 2020b), milho (BOCCHINI et al., 2018), e sorgo (DJANAGUIRAMAN; PRASAD; SEPPANEN, 2010).

Nesse estudo, foi observado que, apesar de não haver diferenças estatísticas na concentração de H_2O_2 entre os tratamentos, o conteúdo de MDA foi maior no controle. O MDA é um marcador de peroxidação lipídica (CABRAL GOUVEIA et al., 2020), o que reforça a hipótese de que o Se atua na proteção das membranas celulares contra danos causados por espécies reativas de oxigênio.

Dessa forma, o Se pode ter impulsionado a atividade das enzimas antioxidantes responsáveis pela degradação de H_2O_2 , impedindo sua conversão em radicais altamente prejudiciais às estruturas celulares (GILL; TUTEJA, 2010). Esse resultado é relevante pois reitera a importância do Se na proteção celular, já que o menor acúmulo de MDA nos tratamentos com Se indica maior peroxidação lipídica e, consequentemente, menos degradação das membranas celulares (HUSSAIN et al., 2018).

O déficit hídrico reduziu a proteína foliar na maioria dos tratamentos, exceto na fonte orgânica, onde os valores se mantiveram semelhantes entre os manejos irrigado e déficit hídrico. Isso sugere que o Se na forma orgânica pode ter contribuído para preservar a síntese proteica, evitando degradação excessiva sob estresse. A fonte orgânica contém Se quelatado por glicina, um aminoácido que pode facilitar a absorção e estabilização do Se no metabolismo celular (LI et al., 2023). Essa interação pode ter favorecido a manutenção da estrutura proteica mesmo sob déficit hídrico, minimizando perdas na atividade enzimática e na fotossíntese (SEO et al., 2011).

Os aminoácidos são precursores de proteínas que mantêm funções vitais em espécies vivas. Em condições de déficit hídrico, esses aminoácidos podem não se associar às proteínas prontamente, podendo atuar individualmente como solutos compatíveis e o estresse pode não garantir que essas substâncias sejam transformadas em proteínas (HOSSAIN et al., 2021).

Outro fator importante é que, sob estresse hídrico, as plantas aumentam a síntese de prolina como mecanismo de osmorregulação, ajudando na retenção de água e proteção contra danos oxidativos (SADDIQ et al., 2021). Neste estudo, a aplicação de Se mostrou uma resposta diferenciada: não houve diferenças estatísticas entre os manejos onde foi aplicado Se, indicando que o elemento reduziu a necessidade da planta de ativar mecanismos extremos de defesa. Essa resposta

também foi observada por outros autores em plantas de quinoa (VEGA-RAVELLO et al., 2023).

O conteúdo de AST demonstra que em condições de déficit hídrico, os mecanismos de armazenamento de carboidratos foram afetados, fazendo com que a planta tenha dificuldade em realizar um suprimento energético adequado. Os compostos fenólicos também são essenciais na neutralização de radicais livres, atuando como antioxidantes naturais.

A maior concentração de compostos fenólicos sob déficit hídrico na fonte orgânica sugere que, em condições de estresse, essa formulação ativou uma resposta mais intensa contra a produção de espécies reativas de oxigênio (VARELA et al., 2016). Esse efeito é importante, pois demonstra que o Se pode modular a biossíntese de metabólitos secundários envolvidos na defesa celular, promovendo maior proteção contra danos oxidativos, como observado em estudos com trigo (SANTOS et al., 2024).

Além disso, para a fonte orgânica, foi observada uma redução significativa no conteúdo de clorofila a sob déficit hídrico, reforçando a influência do estresse na degradação dos pigmentos fotossintéticos. Em contrapartida, o mesmo não foi observado nos demais tratamentos. Nesse caso, a fonte orgânica não foi suficiente para garantir a eficiência da manutenção do metabolismo celular. Mas Silva, et al, 2020 afirmam que o Se pode impedir perdas excessivas nos mecanismos de captura de luz e evitar danos severos aos cloroplastos.

Houve redução no conteúdo de carotenoides no tratamento controle sob déficit hídrico, mas a aplicação de Se reduziu significativamente a degradação dos carotenoides nesse manejo, especialmente nas fontes blend e orgânica, indicando que o elemento contribuiu para a preservação dos mecanismos de captura de luz e a proteção dos pigmentos fotossintéticos contra a oxidação (GERGIS DAW et al., 2019).

Esse efeito pode estar diretamente relacionado à ação antioxidante do Se, que minimiza os impactos negativos do déficit hídrico sobre a fotossíntese, permitindo que os cloroplastos mantenham sua funcionalidade e maximizem a eficiência na absorção de energia luminosa. Ao contrário do observado nesse estudo, foram observados aumentos nos conteúdos de carotenoides nas folhas de genótipos gergelim sob déficit hídrico (YOUSSEFZADEH NAJAFABADI; EHSANZADEH, 2017)

A maior biodisponibilidade do Se nas fontes blend e mineral, refletida nos níveis elevados de acúmulo foliar, sugere que essas formulações favorecem uma absorção

mais eficiente do elemento em comparação à fonte orgânica. No entanto, ao analisar o acúmulo de Se no grão, observa-se que sob manejo de déficit hídrico, houve redução da translocação do elemento nas fontes mineral e orgânica. Esse efeito pode estar relacionado à priorização do Se na regulação antioxidante e proteção celular, reduzindo a relação fonte-dreno e limitando o transporte para órgãos reprodutivos.

Apesar dessa diminuição relativa na translocação sob déficit hídrico, todas as fontes de Se contribuíram significativamente para o aumento do teor do elemento nos grãos, reforçando a importância do Se em programas de biofortificação alimentar. Essa característica é relevante para a segurança nutricional, pois favorece uma maior ingestão de Se pela população.

Considerando o consumo diário de 20 g de gergelim produzido com a fonte mineral, no manejo sob déficit hídrico, estima-se uma ingestão de aproximadamente 38 µg de Se, valor seguro e abaixo da recomendação de 55 µg dia⁻¹, garantindo que o consumo desse grão enriquecido não ofereça riscos à saúde humana, podendo ser consumido em maior quantidade.

A fonte de Se utilizada influencia o acúmulo de Ca e Cu na parte aérea do gergelim. Esse elemento participa de processos essenciais, como comunicação celular e resistência estrutural, sendo altamente dependente do fluxo transpiratório para ser transportado da raiz para os órgãos reprodutivos. Com menor disponibilidade de água, a planta pode restringir a absorção e translocação de Ca, comprometendo a integridade das membranas celulares e da parede celular (JING et al., 2024).

O comportamento do Cu, na parte aérea, nos diferentes tratamentos sugere que a fonte mineral favoreceu a absorção do elemento, aumentando sua biodisponibilidade para processos bioquímicos essenciais. O Cu é um cofator fundamental para enzimas antioxidantes e para a cadeia transportadora de elétrons na fotossíntese, sendo crucial para a eficiência metabólica da planta (GUI et al., 2022). Dessa forma, a maior presença de Cu quando utilizada a fonte mineral pode ter contribuído para manter a estabilidade dos processos metabólicos, garantindo que a planta apresentasse melhor desempenho.

Sob déficit hídrico, as raízes reduzem significativamente a capacidade de absorver diversos nutrientes, pois há menor quantidade de água nos poros do solo, reduzindo assim o movimento dos nutrientes em direção às raízes, impactando na absorção por difusão e fluxo de massa, principalmente (ALAM, 1999).

O N, essencial para a síntese proteica e crescimento vegetal, apresentou redução significativa sob déficit hídrico em comparação ao manejo irrigado. Essa queda pode ser atribuída à menor capacidade de absorção e translocação de N para os grãos, possivelmente devido à restrição na movimentação da seiva xilemática e à necessidade da planta de priorizar processos metabólicos críticos à sobrevivência (TAIZ et al., 2017).

Esse efeito reforça o impacto negativo da seca sobre o metabolismo do amido e das proteínas, como discutido anteriormente, onde o Se atuou na preservação dessas reservas, mas não foi suficiente para impedir totalmente as limitações impostas pela redução da translocação de N para os grãos.

Além do N, o acúmulo no grão de P, K, Mg e S também foi inferior nos tratamentos sob déficit hídrico. A ausência de interação estatística entre Se e esses elementos sugere que o manejo hídrico foi o principal fator regulador da absorção, independentemente da presença do Se. Esses nutrientes são essenciais para a fotossíntese, metabolismo energético e ativação enzimática, explicando por que as plantas sob irrigação mantiveram maiores acúmulos nos grãos, favorecendo a produção e a qualidade nutricional (TAIZ et al., 2017).

O déficit hídrico impôs limitações significativas à absorção e translocação de nutrientes, impactando diretamente a eficiência metabólica e nutricional das plantas. Observou-se que a restrição hídrica levou a ajustes bioquímicos, onde a prioridade foi a proteção celular em vez do transporte de elementos essenciais para os órgãos reprodutivos.

A interação entre Se e Fe no metabolismo vegetal revelou uma relação complexa, especialmente em processos relacionados à absorção e atividade enzimática. Dependendo da forma química e das concentrações disponíveis, Se e Fe podem atuar de maneira sinérgica ou antagonista, competindo por transportadores no sistema radicular (GUI et al., 2022).

Quando o Se está na forma de selenato (SeO_4^{2-}), compartilha mecanismos de absorção com o sulfato (SO_4^{2-}) (BOLDRIN et al., 2016), podendo reduzir a disponibilidade de Fe para a planta. Essa competição pode ser ainda mais relevante sob condições de déficit hídrico, onde ambos os elementos desempenham papéis cruciais na resistência ao estresse e na manutenção da estabilidade celular.

A absorção de Fe na fonte orgânica foi mais dependente da disponibilidade de água, o que pode estar relacionado à sua solubilidade e complexação nessa fonte (LI

et al., 2023). Além disso, ao analisar a influência das diferentes formulações de Se no manejo irrigado, a fonte mineral apresentou valores inferiores em comparação ao controle, sugerindo que a eficiência na absorção de Fe pode variar conforme a fonte de Se utilizada.

A disponibilidade de outros micronutrientes nos grãos também foi impactada pelo manejo hídrico, sendo que a absorção de B, Cu, Mn e Zn foi maior quando sob irrigação. Esse resultado sugere que o déficit hídrico também afetou a translocação desses elementos para os grãos, possivelmente devido à redução na atividade radicular e no fluxo de seiva, limitando o movimento de micronutrientes essenciais.

. Esses micronutrientes são fundamentais para a fotossíntese e para a regulação do metabolismo antioxidante, como Cu, Fe, Zn e Mn, que são co-fatores da SOD, o que pode explicar a menor concentração nos grãos sob déficit hídrico (YAO et al., 2013), com a hipótese de que a planta priorizou a utilização desses elementos para potencializar as atividades antioxidantes e reduzir o estresse causado pelo déficit hídrico.

De forma resumida, a análise de componentes principais mostrou que a aplicação de Se nas plantas de gergelim induziu ao aumento das atividades enzimáticas e aumentou o acúmulo de malondialdeído nos tratamentos sob déficit hídrico, reforçando a ideia de que esse elemento pode ser benéfico às plantas e mitigar os danos celulares causados pelo estresse.

Por outro lado, não foi suficiente para reduzir as perdas na produtividade, reforçada pelo menor acúmulo de proteínas e de nutrientes nos grãos que foram afetados pelo déficit hídrico prolongado. Além disso, como relatado por outros autores, as trocas gasosas como *A*, *E* e *gs* são mais eficientes em condição hídrica adequada para a manutenção do metabolismo vegetal, principalmente em plantas C_3 (KAPOOR et al., 2020; RAVELLO et al., 2021; SILVA et al., 2020).

A aplicação de Se contribuiu para a preservação da estabilidade bioquímica e para a proteção contra o estresse oxidativo, mas os efeitos do déficit hídrico sobre a absorção e translocação de nutrientes ainda foram evidentes. Esses achados demonstram a necessidade de estratégias complementares para mitigar os impactos da seca prolongada sobre a produtividade e qualidade nutricional das culturas.

O ajuste do manejo hídrico, aliado a uma nutrição mineral equilibrada e ao uso de fertilizantes com elementos benéficos que favoreçam a mobilidade dos nutrientes,

pode ser essencial para garantir melhor desempenho fisiológico e maior resiliência das plantas frente ao estresse ambiental.

Além disso, compreender as interações dos nutrientes com o Se pode ser um fator chave na formulação de programas de biofortificação, garantindo que esses elementos sejam aproveitados de maneira eficiente para maximizar a nutrição e a resistência das plantas ao déficit hídrico.

5. CONCLUSÃO

O uso do Se, independente da fonte, não foi suficiente para reduzir os danos pelo déficit hídrico, de forma que refletisse na produtividade. No entanto, atuou de forma positiva, ajustando o aparelho fotossintético durante déficit hídrico moderado e no período pós-estresse, quando as plantas foram reidratadas, nesse caso, com destaque para a fonte mineral. Ativou o metabolismo enzimático e não enzimático, protegendo as células do estresse.

As fontes utilizadas aumentaram o acúmulo do Se no tecido foliar e nos grãos de gergelim, confirmando o potencial da cultura para biofortificação.

Considerando que este estudo foi conduzido em casa de vegetação, torna-se essencial realizar testes em condições de campo, para validar os resultados, onde a interação com outros fatores como temperatura, radiação e dinâmica do solo pode influenciar a resposta da planta ao Se.

6. CONSIDERACOES FINAIS

Diante dos resultados apresentados, é importante reforçar a relevância da produção de gergelim no Brasil e a utilização do selênio na agricultura como elemento benéfico e estratégico para garantir a segurança alimentar e, assim, ir ao encontro dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das nações unidas (ONU).

O gergelim se destaca como uma cultura tolerante capaz de produzir em condições adversas com baixo investimento de produção, e oferece diversos benefícios à saúde humana que são potencializados quando o Se é inserido no sistema produtivo.

O Se tem papel duplo, sendo muito importante para a nutrição humana e atua como elemento benéfico para as plantas e, para ambos, é capaz de ativar os sistemas de defesa e assim reduzir os danos causados nas células por espécies reativas de oxigênio. No entanto, torna-se necessário aumentar os incentivos nessa área do conhecimento para garantir que as quantidades aplicadas sejam suficientes para que a planta absorva em níveis adequados a elas e seguro para o consumo humano, animal e sustentável para o meio ambiente.

Nesse trabalho, ficou evidente que há um enorme potencial para a integração dos temas abordados no contexto agrícola brasileiro, pois existe a possibilidade de implantação pelo agricultor em todos os níveis tecnológicos por ser estratégias de baixo investimento. O fortalecimento da cadeia produtiva do gergelim, aliado ao uso estratégico do selênio, pode não apenas garantir benefícios econômicos, mas também desempenhar um papel significativo no combate à fome e na promoção da saúde da população.

Por fim, é necessário que essas metodologias sejam repetidas em campo, nos diversos sistemas agrícolas para garantir a repetibilidade desses resultados. Nesse contexto, importante uma visão integrada para que a inovação, sustentabilidade e igualdade caminhem juntas permitindo um futuro alimentar mais seguro e nutritivo, consolidando práticas agrícolas que poderão beneficiar a sociedade como um todo.

REFERENCIAS

- AHMAD, R. et al. Selenium (Se) improves drought tolerance in crop plants – a myth or fact? **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 2, p. 372–380, 30 jan. 2016.
- AKHTER ANSARI, W. et al. Influence of Drought Stress on Morphological, Physiological and Biochemical Attributes of Plants: A Review. **Biosciences, Biotechnology Research Asia**, v. 16, n. 04, p. 697–709, 31 dez. 2019.
- ALAM, S. M. Nutrient Uptake by Plants Under Stress Conditions. Em: PESSARAKLI, M. (Ed.). **Handbook of Plant and Crop Stress, Second Edition**. Books in Soils, Plants, and the Environment. [s.l.] CRC Press, 1999. v. 19990540p. 285–313.
- ALVES, L. R. et al. Mechanisms of cadmium-stress avoidance by selenium in tomato plants. **Ecotoxicology**, v. 29, n. 5, p. 594–606, jul. 2020.
- ANDRADE, F. R. et al. Selenium protects rice plants from water deficit stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 164, p. 562–570, nov. 2018.
- BAO, Y. et al. Plant roots use a patterning mechanism to position lateral root branches toward available water. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 25, p. 9319–9324, 24 jun. 2014.
- BENEDITO, S. K. et al. Zinc determination in common beans by pXRF: An easy and versatile calibration strategy applied to biofortification studies. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 137, p. 106851, jan. 2025.
- BIEMELT, S.; KEETMAN, U.; ALBRECHT, G. Re-Aeration following Hypoxia or Anoxia Leads to Activation of the Antioxidative Defense System in Roots of Wheat Seedlings¹. **Plant Physiology**, v. 116, n. 2, p. 651–658, 1 fev. 1998.
- BOCCHINI, M. et al. Soil Selenium (Se) Biofortification Changes the Physiological, Biochemical and Epigenetic Responses to Water Stress in Zea mays L. by Inducing a Higher Drought Tolerance. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 389, 27 mar. 2018.
- BOLDRIN, P. F. et al. Selenium promotes sulfur accumulation and plant growth in wheat (*Triticum aestivum*). **Physiologia Plantarum**, v. 158, n. 1, p. 80–91, set. 2016.
- CABRAL GOUVEIA, G. C. et al. Selenium toxicity stress-induced phenotypical, biochemical and physiological responses in rice plants: Characterization of symptoms and plant metabolic adjustment. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 202, p. 110916, out. 2020.
- CANTARELLA, H. et al. **BOLETIM 100: RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO E CALAGEM PARA O ESTADO DE SÃO PAULO**. [s.l.] Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), 2022.
- CAVERZAN, A. et al. Plant responses to stresses: role of ascorbate peroxidase in the antioxidant protection. **Genetics and Molecular Biology**, v. 35, n. 4 suppl 1, p. 1011–1019, 2012.

CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I. Regime hídrico de alguns solos de Jaboticabal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 4, p. 701–709, dez. 2000.

CHAUHAN, R. et al. Understanding selenium metabolism in plants and its role as a beneficial element. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 21, p. 1937–1958, 2 nov. 2019.

CHRISTO, B. F. et al. Sesame: A viable economic alternative for off-season double cropping systems in Mato Grosso, Brazil. **Agrometeoros**, v. 32, 26 nov. 2024.

DA SILVA, D. F. et al. Anatomical and physiological characteristics of *Raphanus sativus* L. submitted to different selenium sources and forms application. **Scientia Horticulturae**, v. 260, p. 108839, jan. 2020.

DISCHE, Z. **Methods in carbohydrates chemistry**. In: Whistler R, Kearsley MW (eds) *Methods in carbohydrates chemistry*, 2nd ed. Academic Press, New York, 478–512, (1962).

DJANAGUIRAMAN, M.; PRASAD, P. V. V.; SEPPANEN, M. Selenium protects sorghum leaves from oxidative damage under high temperature stress by enhancing antioxidant defense system. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 999–1007, dez. 2010.

DOS SANTOS, L. C. et al. Enhancing Wheat Resilience to Water Deficit through Selenium Biofortification: Perspectives on Physiological, Biochemical and Nutritional Responses. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 24, n. 4, p. 7418–7435, dez. 2024.

FYLES, H.; MADRAMOOTOO, C. Key Drivers of Food Insecurity. Em: **Emerging Technologies for Promoting Food Security**. [s.l.] Elsevier, 2016. p. 1–19.

GERGIS DAW, M. et al. Comparison Between the Physiological Role of Carrot Root Extract and β -carotene in Inducing *Helianthus annuus* L. Drought Tolerance. **Asian Journal of Biological Sciences**, v. 12, n. 2, p. 231–241, 15 mar. 2019.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide Dismutases: I. Occurrence in Higher Plants. **Plant Physiology**, v. 59, n. 2, p. 309–314, 1 fev. 1977.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 909–930, dez. 2010.

GUI, J.-Y. et al. Interaction between selenium and essential micronutrient elements in plants: A systematic review. **Science of The Total Environment**, v. 853, p. 158673, dez. 2022.

HAILU, E. K. et al. Sesame Yield Response to Deficit Irrigation and Water Application Techniques in Irrigated Agriculture, Ethiopia. **International Journal of Agronomy**, v. 2018, p. 1–6, 2 dez. 2018.

HAVIR, E. A.; MCHALE, N. A. Biochemical and Developmental Characterization of Multiple Forms of Catalase in Tobacco Leaves. **Plant Physiology**, v. 84, n. 2, p. 450–455, 1 jun. 1987.

HENDRIKS, J. H. M. et al. ADP-Glucose Pyrophosphorylase Is Activated by Posttranslational Redox-Modification in Response to Light and to Sugars in Leaves of Arabidopsis and Other Plant Species. **Plant Physiology**, v. 133, n. 2, p. 838–849, 1 out. 2003.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The water culture method for growing plants without soil. Berkeley, Calif. Agric. Exp. Station, 32p. 1950.

HOSSAIN, A. et al. Selenium Biofortification: Roles, Mechanisms, Responses and Prospects. **Molecules**, v. 26, n. 4, p. 881, 7 fev. 2021.

HUSSAIN, H. A. et al. Chilling and Drought Stresses in Crop Plants: Implications, Cross Talk, and Potential Management Opportunities. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 393, 10 abr. 2018.

JING, T. et al. Role of calcium nutrition in plant Physiology: Advances in research and insights into acidic soil conditions - A comprehensive review. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 210, p. 108602, maio 2024.

KANG, Y. et al. Selenium Fertilizer Improves Microbial Community Structure and Diversity of Rhizospheric Soil and Selenium Accumulation in Tomato Plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 55, n. 10, p. 1430–1444, 30 maio 2024.

KAPOOR, D. et al. The Impact of Drought in Plant Metabolism: How to Exploit Tolerance Mechanisms to Increase Crop Production. **Applied Sciences**, v. 10, n. 16, p. 5692, 17 ago. 2020.

LANGYAN, S. et al. Food and nutraceutical functions of sesame oil: An underutilized crop for nutritional and health benefits. **Food Chemistry**, v. 389, p. 132990, set. 2022.

LANZA, M. G. D. B.; REIS, A. R. D. Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 164, p. 27–43, jul. 2021.

LICHTENTHALER, H. K.; BUSCHMANN, C. Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV - VIS Spectroscopy. **Current Protocols in Food Analytical Chemistry**, v. 1, n. 1, ago. 2001.

LI, F. et al. Preparation of Zn-Gly and Se-Gly and Their Effects on the Nutritional Quality of Tea (*Camellia sinensis*). **Plants**, v. 12, n. 5, p. 1049, 25 fev. 2023.

MAFAKHERI, A. et al. Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll contents in three chickpea cultivars. v. 4, p. 580–585, 2010.

MARAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; SEBASTIÃO ALBERTO DE OLIVEIRA. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba-SP: POTAFOS, 1997.

MATEUS, M. P. D. B. et al. Selenium biofortification enhances ROS scavenge system increasing yield of coffee plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 209, p. 111772, fev. 2021.

MILLER, G. L. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. **Analytical Chemistry**, v. 31, n. 3, p. 426–428, 1 mar. 1959.

MIRJAHANMARDI, H.; EHSANZADEH, P. Iron supplement ameliorates drought-induced alterations in physiological attributes of fennel (*Foeniculum vulgare*). **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 106, n. 1, p. 61–76, set. 2016.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen Peroxide is Scavenged by Ascorbate-specific Peroxidase in Spinach Chloroplasts. **Plant and Cell Physiology**, ago. 1981.

OROSA-PUENTE, B. et al. Root branching toward water involves posttranslational modification of transcription factor ARF7. **Science**, v. 362, n. 6421, p. 1407–1410, 21 dez. 2018.

PEÑA, E. A.; SLATE, E. H. Global Validation of Linear Model Assumptions. **Journal of the American Statistical Association**, v. 101, n. 473, p. 341–354, mar. 2006.

RAVELLO, R. A. V. et al. Selenium application influenced selenium biofortification and physiological traits in water-deficit common bean plants. **Crop and Pasture Science**, v. 73, n. 2, p. 44–55, 16 jul. 2021.

SADDIQ, M. S. et al. Effect of Water Stress on Grain Yield and Physiological Characters of Quinoa Genotypes. **Agronomy**, v. 11, n. 10, p. 1934, 27 set. 2021.

SAIDI, I.; CHTOUROU, Y.; DJEBALI, W. Selenium alleviates cadmium toxicity by preventing oxidative stress in sunflower (*Helianthus annuus*) seedlings. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, n. 5, p. 85–91, mar. 2014.

SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro De Classificação De Solos**. [s.l.] Embrapa, 2018.

SANTOS, L. C. D. et al. Soil Application of Selenium in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Under Water Stress Improves Grain Quality and Reduces Production Losses. **Plants**, v. 13, n. 24, p. 3460, 10 dez. 2024.

SANTOS, M. G. et al. Photosynthetic parameters and leaf water potential of five common bean genotypes under mild water deficit. **Biologia plantarum**, v. 53, n. 2, p. 229–236, 1 jun. 2009.

SEO, J. et al. OsbHLH148, a basic helix-loop-helix protein, interacts with OsJAZ proteins in a jasmonate signaling pathway leading to drought tolerance in rice. **The Plant Journal**, v. 65, n. 6, p. 907–921, mar. 2011.

SILVA, V. M. et al. Selenate and selenite affect photosynthetic pigments and ROS scavenging through distinct mechanisms in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) walp) plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 201, p. 110777, set. 2020.

SZŐLLŐSI, R. Superoxide Dismutase (SOD) and Abiotic Stress Tolerance in Plants. Em: **Oxidative Damage to Plants**. [s.l.] Elsevier, 2014. p. 89–129.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. [s.l.] Artmed, 2017.

THUC, L. V. et al. Foliar selenium application for improving drought tolerance of sesame (*Sesamum indicum* L.). **Open Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 93–101, 16 fev. 2021.

VARELA, M. C. et al. Phenolic compounds as indicators of drought resistance in shrubs from Patagonian shrublands (Argentina). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 104, p. 81–91, jul. 2016.

VARSHNEY, R. K.; ROORKIWAL, M.; NGUYEN, H. T. Legume Genomics: From Genomic Resources to Molecular Breeding. **The Plant Genome**, v. 6, n. 3, p. plantgenome2013.12.0002in, nov. 2013.

VEGA-RAVELLO, R. et al. Soil Selenium Addition for Producing Se-Rich Quinoa and Alleviating Water Deficit on the Peruvian Coast. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 1, p. 238–250, mar. 2023.

VELIKOVA, V.; YORDANOV, I.; EDREVA, A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants. **Plant Science**, v. 151, n. 1, p. 59–66, fev. 2000.

WAADT, R. et al. Plant hormone regulation of abiotic stress responses. **Nature Reviews Molecular Cell Biology**, v. 23, n. 10, p. 680–694, out. 2022.

YAO, X. et al. Effects of selenium on agronomical characters of winter wheat exposed to enhanced ultraviolet-B. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 92, p. 320–326, jun. 2013.

YEMM, E. W.; COCKING, E. C.; RICKETTS, R. E. The determination of amino-acids with ninhydrin. **The Analyst**, v. 80, n. 948, p. 209, 1955.

YOUSEFZADEH NAJAFABADI, M.; EHSANZADEH, P. Photosynthetic and antioxidative upregulation in drought-stressed sesame (*Sesamum indicum* L.) subjected to foliar-applied salicylic acid. **Photosynthetica**, v. 55, n. 4, p. 611–622, 1 dez. 2017.

ZANANDREA, I. et al. Tolerance of *Sesbania virgata* plants to flooding. **Australian Journal of Botany**, v. 57, n. 8, p. 661, 2009.

ZHAO, Y. et al. Control of Plant Water Use by ABA Induction of Senescence and Dormancy: An Overlooked Lesson from Evolution. **Plant and Cell Physiology**, v. 58, n. 8, p. 1319–1327, 1 ago. 2017.

APÊNDICE

Tabela 1. Acúmulo de nutrientes na arte aérea de cultivares de gergelim (BRS Anahí e BRS Seda) em função da aplicação de doses de Se via solo (g ha^{-1})

Cultivar	S	B	Fe
	mg planta^{-1}	$\mu\text{g planta}^{-1}$	
Anahí	48,6	1957,8	3295,2
Seda	46,2	1961,0	3556,9
CV%	7,5	3,2	3,5

Tabela 2. Acúmulo de macronutrientes na parte aérea de gergelim cultivado com diferentes fontes de selênio, irrigado e em déficit hídrico

Fonte	Manejo	N	P	K	Mg	S
		mg planta^{-1}				
Mineral	DH	197,83	16,58	193,65	21,94	23,79
Orgânico	DH	178,40	13,99	201,86	22,53	19,69
Blend	DH	199,22	16,76	212,53	23,45	22,56
Controle	DH	182,60	15,96	208,89	23,22	22,28
Mineral	Irrigado	175,46	15,42	237,44	24,55	23,46
Orgânico	Irrigado	179,50	12,91	209,43	20,69	18,93
Blend	Irrigado	168,98	15,57	221,95	24,12	20,50
Controle	Irrigado	219,19	16,57	255,71	33,13	25,65
CV%		9,81	9,78	7,60	11,24	9,98

Tabela 3. Acúmulo de micronutrientes na parte aérea de gergelim cultivado com diferentes fontes de selênio, irrigado e em déficit hídrico

Fonte	Manejo	B	Fe	Mn	Zn
		$\mu\text{g planta}^{-1}$			
Mineral	DH	540,28	1258,63	1355,76	234,06
Orgânico	DH	454,72	1167,28	1175,46	291,16
Blend	DH	473,98	1267,81	1008,37	274,58
Controle	DH	508,03	1125,25	936,89	248,55
Mineral	Irrigado	524,47	1297,39	1180,86	287,49
Orgânico	Irrigado	473,49	1473,79	1143,72	271,87
Blend	Irrigado	539,40	1223,53	1473,97	341,05
Controle	Irrigado	561,87	1574,59	1208,16	275,16
CV%		10,05	11,56	14,08	9,14

