



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**



**CARLOS HENRIQUE LEMOS**

**SELÊNIO NO CONDICIONAMENTO FISIOLÓGICO DE SEMENTES E NA  
BIOFORTIFICAÇÃO DE MICROVERDES DE LENTILHA**

**UBERLÂNDIA-MG**

**2025**

**CARLOS HENRIQUE LEMOS**

**SELÊNIO NO CONDICIONAMENTO FISIOLÓGICO DE SEMENTES E NA  
BIOFORTIFICAÇÃO DE MICROVERDES DE LENTILHA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia para obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Produção Vegetal

Orientador: Prof. Dr. José Magno Queiroz Luz

UBERLÂNDIA-MG

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

L557  
2025

Lemos, Carlos Henrique, 1980-  
Selênio no condicionamento fisiológico de sementes e na  
biofortificação de microverdes de lentilha. [recurso eletrônico] /  
Carlos Henrique Lemos. - 2025.

Orientador: Jose Magno Queiroz Luz.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Pós-graduação em Agronomia.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.312>  
Inclui bibliografia.

1. Agronomia. I. Luz, Jose Magno Queiroz, 1967-, (Orient.). II.  
Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em  
Agronomia. III. Título.

CDU: 631

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

:

CARLOS HENRIQUE LEMOS

**SELÊNIO NO CONDICIONAMENTO FISIOLÓGICO DE SEMENTES E NA  
BIOFORTIFICAÇÃO DE MICROVERDES DE LENTILHA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de  
Uberlândia, como parte das exigências do Programa de  
Pós-graduação em Agronomia, para obtenção do título  
de Mestre.

Área de concentração: Produção Vegetal

APROVADA em 22 de maio de 2025

Banca examinadora:

Prof. Dr. Hugo César R. Moreira Catão

UFU

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Renata Castoldi

UFU

Dr. Warley Marcos Nascimento

EMBRAPA

Prof. Dr. José Magno Queiroz Luz  
ICIAG-UFU  
(Orientador)

UBERLÂNDIA/MG  
2025



## **ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO**

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 011/2025, PPGAGRO				
Data:	Vinte e dois de maio de dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	11:30
Matrícula do Discente:	12312AGR005				
Nome do Discente:	Carlos Henrique Lemos				
Título do Trabalho:	Selênio no condicionamento fisiológico de sementes e na biofortificação de microverdes de lentilha				
Área de concentração:	Produção Vegetal				
Linha de pesquisa:	Produção Vegetal em Áreas de Cerrado				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Hugo César Rodrigues Moreira Catão - UFU; Renata Castoldi - UFU; Warley Marcos Nascimento - Embrapa; José Magno Queiroz Luz - UFU - orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. José Magno Queiroz Luz, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

**APROVADO**

Essa dissertação possui mérito para ser indicada como destaque do Programa? (X)  
SIM NÃO ( )

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **José Magno Queiroz Luz, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/05/2025, às 21:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Hugo Cesar Rodrigues Moreira Catão, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/05/2025, às 21:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renata Castoldi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/05/2025, às 11:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Warley Marcos Nascimento, Usuário Externo**, em 05/06/2025, às 08:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6358604** e o código CRC **1AA8F28C**.

## AGRADECIMENTOS

O desconhecido faz crescer, resistir, superar e permanecer firme em um propósito de sermos melhores e tornar o mundo em que vivemos um local de esperança, fé, paz, alegria e amor.

Aos meus pais, Tomé Marcelo Lemos (*in memoria*) e Maria Honória de Souza Lemos, por estarem sempre presentes no meu coração, por ter sido e ser um exemplo de o apoio e amor. Em especial minha mãe, saiba que devo tudo a você, que me ensinou a mais linda lição, nunca desistir. Obrigado por fazer parte da minha vida e me apoiar em todo esse percurso.

A minha família e amigos, mesmo de longe sempre senti o apoio e a energia positiva que emaram.

À Deus, autor da vida, por sempre guiar meus passos, me dando força, discernimento, sabedoria e fé.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Magno pela parceria, pelos ensinamentos, pela paciência e suporte para realizar este trabalho, um grande exemplo de docente.

Aos companheiros Ricardo Domingues, Brenda Pontes e Dr. Adílio de Sá Júnior, do Laboratório de Sementes da Universidade Federal de Uberlândia, pelo grande apoio, a ajuda de vocês foi imprescindível para o trabalho.

Ao Prof. Dr. Warley Nascimento, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária por disponibilizar as sementes de lentilha utilizadas durante todo o experimento.

Aos membros da banca, pela prontidão e contribuições ao trabalho.

A Universidade Federal de Uberlândia e ao Instituto de Ciências Agrárias, pela oportunidade de realizar o mestrado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida durante os anos de curso.

Muito obrigado a todos.

“O sucesso não é definitivo, o  
fracasso não é fatal: é a coragem de  
continuar que conta.”  
– Winston Churchill

## RESUMO GERAL

LEMOS, Carlos Henrique. **Selênio no condicionamento fisiológico de sementes e na biofortificação de microverdes de lentilha**. 2025. 88 f. Dissertação (Mestrado em Olericultura) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. 2025.

A lentilha é uma leguminosa muito cultivada e consumida mundialmente, sendo de suma importância econômica e fonte nutricional. O *priming* destaca-se por ser uma técnica prática, rápida e de baixo custo, oferecendo diversas vantagens para agricultores que não dispõem de equipamentos avançados, proporcionando uma alternativa eficaz para aumentar o vigor e a produtividade das plântulas. Neste estudo, investigou-se a hipótese que a aplicação de selênio (Se), por meio do *osmopriming*, seria uma abordagem eficaz para melhorar as respostas fisiológicas, resultando em melhor produtividade e qualidade de sementes e microverdes de lentilha, sendo avaliadas duas fontes de Se ( $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  e  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ) em cinco concentrações (0;1;5;10 e 20  $\text{mg L}^{-1}$ ) sobre a variedade “BRS Mimi”. Até onde sabemos, esta é a primeira aplicação dessa técnica de condicionamento de sementes com Se para essa cultivar, o que pode apoiar sua maior integração no combate as deficiências nutricionais, especialmente no contexto da fome oculta ocasionadas por dietas desequilibradas. Estudos anteriores indicam que essa abordagem pode ser eficaz para melhorar o desempenho germinativo das sementes e microverdes. O *osmopriming* e *osmopriming* com selenato são estratégias promissoras para aumentar a viabilidade de sementes, sendo o *osmopriming* com selenito eficaz na biofortificação de microverdes de lentilha.

Palavras-chave: selenito e selenato de sódio; *nutriprimig*; germinação; plântulas; *Lens culinaris* M.

## GENERAL ABSTRACT

LEMOS, Carlos Henrique. **Selenium in physiological seed conditioning and biofortification of lentil microgreens**. 2025. 88 f. Dissertation (Master's Degree in Olericulture) - Institute of Agrarian Sciences, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG. 202.

The lentil is a legume that is widely grown and consumed throughout the world, and is of great economic importance and a nutritional source. Priming stands out for being a practical, fast and low-cost technique, offering several advantages for farmers who do not have advanced equipment, providing an effective alternative for increasing seedling vigor and productivity. In this study, we investigated the hypothesis that the application of selenium (Se) through combined priming would be an effective approach to improve physiological responses, resulting in better productivity and quality of lentil seeds and microgreens, being evaluated two Se sources ( $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  and  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ) at five concentrations (0; 1; 5; 10 and 20  $\text{mg L}^{-1}$ ) of the "BRS Mimi" variety. As far as we know, this is the first application of this seed conditioning technique with Se for this cultivar, which could support its greater integration in the fight against nutritional deficiencies, especially in the context of hidden hunger caused by unbalanced diets. Previous studies indicate that this approach can be effective in improving the germination performance of seeds and microgreens. Osmopriming and osmopriming with selenate are promising strategies for enhancing seed viability, with osmopriming using selenite being effective for the biofortification of lentil microgreens.

Keywords: sodium selenite and selenate; nutripriming; germination; seedlings; *Lens culinaris* M.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

QUADRO 1. Componentes nutricionais em sementes de lentilha .....	21
QUADRO 2. Biofortificação com selenato e/ou selenito de sódio e seus potenciais benefícios a saúde em vários tipos de microverdes comestíveis .....	37
FIGURA 1. Teor de água (%) após o osmocondicionamento e após a secagem das sementes de lentilha (cv. BRS Mimi), nas diferentes soluções de selênio: selenato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ ) e selenito de sódio ( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ). Os tratamentos foram realizados com concentrações de 0, 1, 5, 10 e 20 $\text{mg L}^{-1}$ (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) sob potencial osmótico de -0,8 MPa, durante 12 horas .....	47
FIGURA 2. Evolução da germinação em sementes de lentilha, cv. BRS Mimi, osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ ) e selenito de sódio ( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ), nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 $\text{mg L}^{-1}$ (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) , a -0,8 MPa por 12h, pelo período de 24h a 240h. Onde: *Análise feita em duplas para cada combinação dos fatores (concentração x fonte ao longo do tempo) .....	48
FIGURA 3. Germinação (%) de sementes de lentilha, cv. BRS Mimi, osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 $\text{mg L}^{-1}$ (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h .....	50
FIGURA 4. Primeira contagem de germinação (%) de sementes de lentilha, cv. BRS Mimi, osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 $\text{mg L}^{-1}$ (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h .....	51
FIGURA 5. Tempo médio de germinação (dias) de sementes de lentilha, cv. BRS Mimi, osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 $\text{mg L}^{-1}$ (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h .....	52
FIGURA 6. Médias de massa seca ( $\text{mg plântula}^{-1}$ ) de plântulas de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio	

e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h .....53

FIGURA 7. Comprimento da raiz (cm) de plântulas de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h .....55

FIGURA 8. Comprimento da parte aérea (cm) de plântulas de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h .....56

FIGURA 9. Comprimento total (cm) de plântulas de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h .....57

FIGURA 10. Médias da quantidade de selênio (mg kg<sup>-1</sup>) de microverdes de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h .....62

FIGURA 11. Médias da quantidade de clorofila A (mg g<sup>-1</sup>) de microverdes de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h .....64

FIGURA 12. Médias da quantidade de clorofila B (mg g<sup>-1</sup>) de microverdes de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h .....65

FIGURA 13. Médias da quantidade de clorofila total (mg g<sup>-1</sup>) de microverdes de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h .....66

FIGURA 14. Médias da quantidade de carotenoides ( $\text{mg g}^{-1}$ ) de microverdes de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20  $\text{mg L}^{-1}$  (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h .....67

FIGURA 15. Médias da atividade antioxidante (%) pelo método DPPH em microverdes de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20  $\text{mg L}^{-1}$  (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h .....69

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Caracterização inicial da qualidade fisiológica de sementes de lentilha por meio dos testes de teor de água (%), germinação (%), emergência (%) e massa seca total (mg/plântula) cultivar Brs Mimi .....41

TABELA 2. Massa fresca ( $\text{mg plântula}^{-1}$ ), altura ( $\text{cm plântula}^{-1}$ ) e rendimento ( $\text{mg m}^{-2}$ ) de microverdes de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selênio (selenato de sódio e selenito de sódio) nas concentrações (0; 1; 5; 10 e 20  $\text{mg L}^{-1}$ ) a -0,8 MPa por 12h \*.....60

## SUMÁRIO

RESUMO GERAL .....	6
GENERAL ABSTRACT .....	7
1 INTRODUÇÃO .....	15
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	19
2.1 A lentilha ( <i>Lens culinaris</i> Medik) .....	19
2.2 A importância do selênio no contexto da biofortificação agrônômica .....	22
2.3 Germinação e o transporte de selênio nas plantas .....	30
2.4 Microverdes .....	34
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	41
3.1 Obtenção das cultivares de lentilha .....	41
3.2 Local e delineamento experimental .....	41
3.3 Caracterização da qualidade inicial das sementes .....	41
3.4 Osmocondicionamento .....	42
3.5 Ensaio 1 - Efeito do condicionamento fisiológico sobre a qualidade de sementes .....	42
3.6 Ensaio 2 - Cultivo de microverdes para determinação dos parâmetros de produtividade, morfológicos e fitoquímicos .....	44
3.7 Análise Estatística .....	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	47
4.1 Ensaio 1 .....	47
4.2 Ensaio 2 .....	59
5 CONCLUSÃO .....	71
REFERÊNCIAS .....	72

## 1 INTRODUÇÃO

A insegurança alimentar afeta bilhões de pessoas em todo o mundo, retrocedendo os avanços de 15 anos na luta contra a fome. Atualmente, uma em cada 11 pessoas sofre de fome ou enfrenta problemas relacionados à insegurança alimentar e à má nutrição (Fao et al., 2024). De acordo com o Relatório dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) de 2023, o Objetivo 2, "Fome zero", aponta que uma significativa parcela da população global não dispõe de recursos financeiros suficientes para garantir o acesso a dietas saudáveis (Nações Unidas, 2023). Paralelamente, outra parte da população, com maior poder aquisitivo, encontra-se supernutrida como resultado de dietas desequilibradas (Ebert, 2022). A insegurança alimentar engloba tanto a "fome total" quanto a "fome parcial ou oculta" (Weffort; Lamounier, 2024), comprometendo o desenvolvimento humano, ocasionando perdas irreparáveis e aumentando a vulnerabilidade das populações a uma série de doenças (Das; Padhani, 2022).

Uma dieta saudável é fundamental para fornecer os nutrientes necessários, promover a saúde e prevenir doenças, sendo a biofortificação uma estratégia potencial para atingir esses objetivos (Sheoran *et al.*, 2022). Essa técnica surge como uma abordagem sustentável para a segurança nutricional e desempenha papel crucial no combate à chamada "epidemia silenciosa" causada pela deficiência de micronutrientes (Dhaliwal *et al.*, 2022). Segundo Teklu *et al.* (2023), tanto a fortificação como as biofortificações genética e agronômica são excelentes métodos para melhorar o teor de micronutrientes nos alimentos. No entanto, a fortificação depende do processamento industrial, o que pode limitar sua aplicação em regiões com acesso restrito a alimentos processados (Teklu *et al.*, 2023). Já na biofortificação biotecnológica por engenharia genética, destacam-se os riscos associados a manipulação genética, cujos efeitos são ainda desconhecidos e as questões éticas impõem barreiras que limitam seu uso (Sarwar *et al.*, 2020). Diante destas limitações, a biofortificação agronômica configura-se como uma alternativa simples (Sheoran *et al.*, 2022), oportuna, rápida, sustentável e economicamente viável para o enriquecimento de plantas com micronutrientes como ferro, zinco, iodo e selênio (Se) em partes comestíveis de culturas elementares essenciais (Avnee *et al.*, 2023). Sobretudo, uma abordagem bioquímica promissora (Gui *et al.*, 2022) para elevar os teores de Se em vegetais (Xiao *et al.*, 2024).

Entre as abordagens da biofortificação agronômica, a aplicação de Se têm sido amplamente pesquisada (Teklu *et al.*, 2023), em especial no condicionamento de sementes em espécies agrícolas (Sariñana-Navarrete *et al.*, 2024). A técnica fisiológica de hidratação e desidratação controlada (Raj; Raj, 2019), também conhecida como "priming de sementes",

promove a uniformidade de emergência (Ishtiaq *et al.*, 2023) e melhora a taxa de germinação e as características de vigor de plântulas (Sariñana-Navarrete *et al.*, 2024). Dentre os métodos de condicionamento, o *osmopriming* é um processo em que as sementes são embebidas em soluções osmóticas (Lei *et al.*, 2021), já o *nutripriming* consiste no tratamento das sementes com a aplicação de uma solução nutritiva que não só proporciona benefícios fisiológicos, mas também eleva o conteúdo de nutrientes nas sementes e plântulas (Khan *et al.*, 2024). São relatados estudos de *nutripriming* com Se, com fontes de selenato e/ou selenito, na biofortificação de sementes em soja (Huang *et al.*, 2022), em alfafa, rabanete e mostarda branca (Woch; Hawrylak-Nowak, 2019), brócolis (Ávila *et al.*, 2013), arroz (Hussain *et al.*, 2016), feijão (Mansoor *et al.*, 2024), pimenta jalapeño (Sariñana-Navarrete *et al.*, 2024), camelina e canola (Ahmad *et al.*, 2021); além de microverdes de arroz (Hu *et al.*, 2022a; Khaliq *et al.*, 2015), trigo (Nawaz *et al.*, 2013) e nabo (Hussain *et al.*, 2023).

O Se é um microelemento não essencial para plantas superiores, mas indispensável para saúde de humanos e animais (Hasanuzzaman *et al.*, 2020a). Além de prevenir doenças relacionadas à sua deficiência, devido ao seu papel essencial no sistema imunológico, também exerce funções importantes em vegetais, promovendo a síntese de compostos bioativos (Huang *et al.*, 2022). Quantidades adequadas de Se nas plantas podem aumentar o teor de metabólitos primários e secundários, favorecendo a eficiência fotoquímica; reduzir danos aos cloroplastos por meio da diminuição de moléculas como peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), superóxido ( $O_2^-$ ) e radicais hidroxila ( $-OH$ ); e, conseqüentemente, regular a atividade de enzimas antioxidantes (Khan *et al.*, 2023). Estudos, como o de Huang *et al.* (2022), mostraram que a biofortificação com Se em soja não apenas intensifica o acúmulo desse mineral, mas também estimula a produção de compostos secundários benéficos.

Nas plantas, o Se é absorvido e metabolizado nos tecidos (Mroczek-Zdyrska *et al.*, 2017), com potencial para melhorar a qualidade dos alimentos e o rendimento das culturas, além de exercer funções antioxidantes e anti-senescentes (Ahmad *et al.*, 2021), atenuando o estresse oxidativo (Hasanuzzaman *et al.*, 2020a). Embora as culturas acumulem quantidades limitadas de Se, uma dieta baseada em vegetais constitui a principal fonte de ingestão desse micronutriente (Ekumah *et al.*, 2021; Izydorczyk *et al.*, 2021). Em excesso, no entanto, o Se pode causar toxidez nas plantas, provocando redução no crescimento, diminuição da síntese proteica, além de sintomas de clorose e necrose devido à incorporação do Se em aminoácidos, substituindo o enxofre (S), modificando a atividade biológica de proteínas, formando ligações Se-Se que são menos estáveis (Mroczek-Zdyrska; Strubińska; Hanaka, 2017). A absorção do Se em leguminosas ocorre, em sua maioria, na forma de selenato e selenito (Gupta; Gupta,

2017), sendo o selenato translocado por transportadores de sulfato (Takahashi *et al.*, 2000) e o selenito por aquaporinas (Zhao *et al.*, 2010) e transportadores de fosfato (Zhang *et al.*, 2014), para posteriormente serem convertidos nas formas orgânicas selenocisteína (SeCys) e selenometionina (SeMet). A biodisponibilidade do Se nas plantas depende dessas formas químicas (Wu *et al.*, 2020) e da seleção de concentrações ótimas para a eficácia da biofortificação (Hasanuzzaman *et al.*, 2020b) .

A lentilha (*Lens culinaris* Medik) pertencente à família Fabaceae, destaca-se por sua alta concentração de micronutrientes e macronutrientes, que promovem saúde, ajudam na perda de peso, oferecem proteção contra doenças crônicas e previnem a anemia (Palomares-Navarro *et al.*, 2023). Amplamente consumida em diversas regiões, a lentilha é a segunda leguminosa mais rica em proteínas, superada apenas pela soja, embora apresente deficiências em aminoácidos essenciais como cisteína e metionina (Chaturvedi *et al.*, 2024). Conforme Thavarajah *et al.* (2017), a biofortificação de sementes de lentilha com Se é promissora para atender às necessidades diárias desse micronutriente na dieta humana.

Em 2022, dados da FAO posicionam a lentilha como a quinta leguminosa mais produzida mundialmente (~6 milhões de toneladas), atrás da soja (~349 milhões de toneladas), feijão (~28 milhões de toneladas), grão-de-bico (~18 milhões de toneladas) e ervilha (~14 milhões de toneladas). Conforme Chaturvedi *et al.* (2024), a baixa produtividade de lentilhas é atribuída a deficiências no manejo agrícola, falta de sementes de qualidade e ausência de assistência técnica qualificada.

No mercado consumidor, particularmente Asia Ocidental e no subcontinente indiano, a lentilha é considerada a principal fonte proteica (Chaturvedi *et al.*, 2024). Sua popularidade entre os consumidores é impulsionada não apenas por seu valor nutricional, mas também pela tendência de mudança de hábitos alimentares, refletindo a preocupação com segurança alimentar e a busca por fontes sustentáveis e saudáveis à base de plantas (Warne *et al.*, 2019). Alimentos frescos em microescala, como sementes germinadas e *microgreens* (microverdes), contribuem para essa diversificação alimentar e ao combate de deficiências nutricionais (Ebert, 2022). Dessa maneira, o osmocondicionamento de sementes de lentilha com Se se torna promissor para biofortificação de microverdes, por ter seu ciclo de desenvolvimento curto, sendo o seu consumo na fase inicial e garantindo a disponibilidade dos nutrientes translocados da semente para a plântula (Gioia *et al.*, 2021). Além disso, os microverdes são alimentos frescos, com baixa caloria e alta digestibilidade, podendo ser consumidos in natura.

A hipótese deste trabalho é que a biofortificação via osmocondicionamento com Se pode potencializar respostas fisiológicas nas sementes de lentilha, resultando em melhor

produtividade e qualidade de microverdes. Portanto, objetivou-se com este estudo avaliar o efeito das fontes de selênio no condicionamento fisiológico das sementes e na biofortificação de microverdes de lentilha.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A lentilha (*Lens culinaris* Medik)

A cultura da lentilha é milenar, remetem-se a cerca de 7000 anos, na bacia do Mediterrâneo, chamada de crescente fértil, região esta conhecida por ser berço da civilização e pela fertilidade o que possibilitou o desenvolvimento da agricultura ou início da "revolução agrícola" (Lobo, 1969). Essa ancianidade foi até reportada em versículo Bíblico: “Então Jacó deu a Esaú pão e ensopado de lentilhas” (Gênesis 25:34). Dessa forma, fica evidenciado-se que a lentilha é uma das plantas alimentícias mais antigas cultivadas pela humanidade.

As sementes se disseminaram por toda região integrando-se à cultura e culinária de diversos países, como na tradição de luto judaico, sendo oferecida aos deuses ou como base na dieta (Singh; Singh, 2014). Em países ocidentais, incluindo o Brasil, existe uma crença que consumindo lentilhas no Réveillon, tal ato trará boa sorte e prosperidade ao novo ano que se inicia (Nascimento, 2019).

A lentilha é uma leguminosa, pertencente à família Fabaceae, gênero *Lens* e espécie *Lens culinaris*, com suas sementes no formato de lentes (duplo-convexo), possuindo distintas cores como vermelha, verde, amarela, preta (Joshi; Timilsena; Adhikari, 2017), divididas em duas categorias principais: macrosperma - sementes grandes (6-9 mm de diâmetro) e, microsperma - sementes menores (3-6 mm de diâmetro) (Palacios *et al.*, 2023).

Mundialmente produzida e consumida, tem a Austrália como principal produtor, aproximadamente 1,84 milhões de toneladas, seguido pelo Canadá, Índia e Turquia com 1,67, 1,56 e 0,47 milhões de toneladas, respectivamente. De acordo com os dados da Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database – Faostat, (2025), esses quatro países representaram cerca de aproximadamente 74% da produção global em 2023. Na América do Sul, apenas Argentina (decimo nono), Peru (vigésimo segundo), Equador (vigésimo terceiro), Colômbia (vigésimo oitavo) e Chile (trigésimo oitavo) figuram no rol de produtores.

Outro aspecto relevante relacionado a produção global, é o crescimento significativo nas últimas décadas, reflexo direto da demanda e popularidade, especialmente nas regiões de maior consumo, como os mercados Asiático, do Oriente Médio e da África. A Índia é o maior importador da leguminosa, com relevantes 1,3 milhões de toneladas a um custo de 543,421 milhões de dólares (Faostat, 2023), respondendo por aproximadamente 23% das importações globais desse produto (Kaale; Siddiq; Hooper, 2023). A relevância da lentilha para o mercado interno indiano, majoritariamente vegetariano e dependente dessa fonte básica proteica, exige

uma grande dependência de importações da leguminosa devido à insuficiência da produção (Horo, 2021). Projeções para o ano de 2050, com o crescente populacional de 1,69 bilhão, demandará do governo indiano a busca de novos mercados e parceiros comerciais, a fim de garantir o sustento alimentar de sua população (Mário Seixas, Elisio Contini, 2018).

Esse rápido crescimento resultou em 3,82 bilhões de dólares em exportações em 2022, com o Canadá respondendo por aproximadamente 43,82% do comércio mundial de lentilhas secas e sem casca, gerando uma receita de 1,64 bilhão de dólares. O Brasil, embora também seja um importador de lentilhas, possui volume de importação modesto, adquirindo cerca de 16,556 mil toneladas de lentilhas, ao custo de 20,460 milhões de dólares (Faostat, 2023). Entretanto, as mudanças nos padrões alimentares em escala global podem impactar o contexto brasileiro, resultando no aumento do consumo interno e estimulando o cultivo doméstico como uma alternativa economicamente viável e de relevância crescente para a rotação de culturas na segunda safra de verão, a chamada safrinha, com destaque para a região do Cerrado brasileiro. (Pinto et al., 2024).

Warne *et al.*, (2019), destacaram as tendências emergentes no cultivo de lentilha voltadas à adoção de práticas agrícolas que favoreçam serviços ecossistêmicos, como agricultura de sequeiro, o cultivo de cobertura, viabilizando a sustentabilidade, como os benefícios rotacionais da cultura, o valor de mercado da lentilha e a fixação biológica de nitrogênio. Essa abordagem de agricultura sustentável tem propiciado uma crescente aceitação de alimentos de origem vegetal, que atendem a um público diversificado, além dos veganos e vegetarianos. Além disso, essas práticas contribuem para a segurança alimentar nacional e para o apoio a agricultores locais, promovendo uma alimentação saudável e podendo ser, uma solução na oferta de produtos com maior valor agregado.

É, possivelmente, uma das leguminosa mais valiosas (Palacios *et al.*, 2023), por ser rica em nutrientes e proteínas (Kaale; Siddiq; Hooper, 2023), nutricionalmente superior, com aporte energético moderado, baixo teor de gordura e fonte significativa de micronutrientes, como ferro, zinco e selênio (Johnson et al., 2024; Siva *et al.*, 2017; Thavarajah *et al.*, 2015). As vantagens alimentícias, graças a excelente composição nutricional (Tabela 1), proporcionam benefícios multinutricionais que atende às demandas dietéticas da população global e contribui em reduzir as perdas econômicas globais associadas à desnutrição (Farooq *et al.*, 2018).

Quadro 1- Componentes nutricionais em sementes de lentilha.

<b>Componentes nutricionais em sementes de lentilha</b>	<b>Quantidades</b>
Proteína (%)	25
Lipídios totais (%)	1
Carboidrato (%)	63
Fibras dietéticas totais (%)	11
Cálcio ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	350
Ferro ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	65
Magnésio ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	470
Potássio ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	6770
Fósforo ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	2810
Sódio ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	60
Zinco ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	33
Vitamina B6 ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	4
Tiamina ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	9
Riboflavina ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	2
Vitamina C ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	45
Vitamina E ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	5
Vitamina A (IU)	39

Fonte. Adaptado de Farooq *et al.* (2018)

Segundo Kumari; Mishra; Chaurasia (2024), o valor calórico é de 1477 KJ (353 Kcal) , além de açúcares, fibras, vitaminas e água por 100 g<sup>-1</sup> semente seca. Cerca de um terço desta energia está armazenada na forma de proteínas, mas as sementes destacam-se por possuírem alto teor de aminoácidos como: ácido glutâmico, ácido aspártico, arginina, leucina, lisina, cistina, triptofano e metionina; além de fitoquímicos bioativos, como flavonoides, fenólicos, carotenoides, ácido fítico e fitosteróis. A presença de fenólicos, em elevado teor, proporciona maior atividade antioxidante em relação a outras leguminosas (Dhull; Kinabo; Uebersax, 2023).

Além da vantagem proteica, quando comparada as ervilhas e grão de bico, seus carboidratos complexos são constituídos de amido de digestão lenta, garantindo baixo índice glicêmico (Oduro-Yeboah *et al.*, 2023).

Como alimento funcional suas propriedades desempenham papel crucial no

metabolismo humano e no equilíbrio nutricional do organismo, contribuindo na prevenção de diversas condições de saúde, como hipertensão, doenças cardiovasculares, diabetes mellitus, câncer (Dhull; Kinabo; Uebersax, 2023; Kaale; Siddiq; Hooper, 2023; Zhang *et al.*, 2018) e obesidade (Siva *et al.*, 2017).

Dessa forma, pode-se dizer que a lentilha encontra-se como alternativa eficaz para combater desequilíbrios e deficiências nutricionais em países em desenvolvimento, realizando papel fundamental na prevenção a desnutrição proteico-energética e, da fome oculta, especialmente por meio da biofortificação (Salaria *et al.*, 2022). Nesse sentido, a leguminosa vem ganhando notoriedade entre consumidores de países desenvolvidos. Em resposta a essa crescente demanda, diversas indústrias de processamento têm investido no desenvolvimento de produtos alimentícios embalados e biofortificados (Kumar *et al.*, 2016).

No entanto, apesar do perfil nutricional único, Ohanenye *et al.* (2020) relataram a presença de substâncias antinutricionais que interagem com as proteínas das sementes, reduzindo ou inibindo sua digestibilidade. Tais substâncias, como a tripsina, lectinas, glicosídeos, fitatos e taninos (Carol Ann Patterson, Julianne Curran, 2017; Kaale; Siddiq; Hooper, 2023) inibem funções enzimáticas ou reduzem a biodisponibilidade de nutrientes. Porém, métodos de processamento adequados (Dhull; Kinabo; Uebersax, 2023) ou o bioprocesso de germinação (Ohanenye *et al.*, 2020) diminuem significativamente esses teores. Dessa forma, torna-se fundamental desenvolver técnicas adequadas que preservem os efeitos benéficos sem comprometer a biodisponibilidade de minerais.

Portanto, que o incentivo ao aumento do consumo de leguminosas deve ser entendido como uma estratégia multifacetada, que vai além das vantagens nutricionais, englobando também impactos positivos de ordem socioeconômica e ambiental (Szczebyło *et al.*, 2020).

## **2.2 O selênio e sua importância na biofortificação agrônômica**

A deficiência de micronutrientes afeta aproximadamente de 2 bilhões de pessoas no mundo (Titcomb; Tanumihardjo, 2019; Sheoran *et al.*, 2022; Jeje; Oluwafemi Gi; Omowaye-Taiwo Oa, 2023). Conhecida também como “fome oculta”, é definida pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como a carência não aparente de um ou mais dos 26 micronutrientes essenciais para o funcionamento adequado do corpo. Mesmo em níveis leves e moderadas, essas deficiências, que por vezes se manifestam silenciosamente, podem provocar o comprometimento do crescimento físico, do desenvolvimento cognitivo e psicomotor, anemia, cegueira noturna, osteoporose e até aumento do risco de câncer (Weffort; Lamounier, 2024).

O selênio (Se) é um dos micronutrientes essenciais para o funcionamento adequado do corpo. E, estima-se que 0,5 a 1 bilhão de pessoas - ou seja, uma em cada sete pessoas, estejam subnutridas devido a deficiência desse mineral, o que é resultante de uma dieta insuficiente ou de baixa qualidade (Jones *et al.*, 2017), sendo portanto, um problema de saúde pública global (Thavarajah *et al.*, 2017).

Sua carência, que pode acontecer de forma assintomática (Silva *et al.*, 2020), está associada a predisposição a doenças cardiovasculares, câncer, infecções virais, diabetes mellitus, doença de Alzheimer, entre outras (Facchinetti *et al.*, 2022). No Brasil, há evidências indicativas da falta de Se na população, porém, os dados de pesquisa disponíveis sobre essa questão permanecem limitados (Reis *et al.*, 2017). Assim, a suplementação de selênio demonstra ser uma técnica eficaz, sendo o aumento da sua concentração nos alimentos de origem vegetal particularmente vantajoso. Isso ocorre porque as plantas constituem a principal fonte do mineral e ocupam papel essencial na nutrição humana (Titov *et al.*, 2022).

O selênio é um valioso componente para o metabolismo humano (Santiago; Souza, 2020) e animal (Mozart *et al.*, 2024), contudo sua presença não é essencial para a maioria das plantas (Boldrin *et al.*, 2018), não sendo necessário para completarem seu ciclo de vida (Silva *et al.*, 2019). Devido ao seu estreito limiar entre benefício e toxicidade, o selênio, em baixas concentrações, atua como potente antioxidante, melhorando a atividade enzimática, a qualidade em algumas plantas (Avnee *et al.*, 2023), protegendo contra estresses oxidativos, biótico e abiótico (Izydorczyk *et al.*, 2021), por exemplo em lentilhas (Ekanayake *et al.*, 2015; Sita *et al.*, 2023; Thavarajah *et al.*, 2015, 2017), ou agindo como protetor contra raios UV e patógenos e como regulador de crescimento (Boldrin *et al.*, 2018). Além disso, a aplicação de selênio exerce função pró-oxidante, promovendo a síntese de pigmentos fotossintéticos, elevando a taxa fotossintética e as trocas gasosas, favorecendo a acumulação de osmoprotetores e estimulando a produção de metabólitos secundários (Xiao *et al.*, 2024). Em altas concentrações, a selenose (toxicidade causada pelo excesso de Se), provoca a malformação de selenoproteínas inespecíficas e a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), resultando em estresse oxidativo. Esses processos podem levar à redução ou atrofia do sistema radicular nas plantas, induzir a clorose, causar perda de biomassa, diminuir a eficiência fotossintética, podendo culminar na morte prematura da planta (Hasanuzzaman *et al.*, 2020b; Molnár *et al.*, 2018; Mroczek-Zdyrska; Strubińska; Hanaka, 2017; Van Hoewyk, 2013). Devido à sua função controversa (Mroczek-Zdyrska; Strubińska; Hanaka, 2017), o selênio é referido como “veneno essencial” (Schiavon *et al.*, 2020).

De acordo com Saha (2017), as plantas absorvem Se do solo principalmente na forma

de selenato ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ) e selenito ( $\text{SeO}_3^{2-}$ ). Essas fontes inorgânicas de Se, que são predominantes em solos agrícolas (Ismael *et al.*, 2019), apresentam alta solubilidade, mobilidade e biodisponibilidade (Yang *et al.*, 2022). Entretanto, a distribuição destas formas de selênio é desigual, o que representa um desafio. A variabilidade da disponibilidade de Se deve-se a fatores como o material de origem (Song *et al.*, 2020), química do solo e distribuição regional (Ekumah *et al.*, 2021). Para Somagattu *et al.* (2024), esses fatores influenciam os processos de absorção, metabolismo e especiação do selênio, afetando assim a composição dos produtos finais que integram nossa dieta e fornecem a ingestão diária necessária de selênio.

Conforme Ekumah *et al.* (2021), a América do Sul não foi poupada deste malefício da má distribuição regional de Se. No Brasil, a vasta extensão territorial resulta em situação contraditória: enquanto a região Amazônica é considerada rica em selênio (Santos; Da Silva Júnior; Muccillo-Baisch, 2017), existem evidências da deficiência do nutriente em outras regiões do país (Reis *et al.*, 2014).

Da mesma maneira, as espécies vegetais apresentam variações em suas capacidades de acumular Se, com algumas plantas sendo eficientes acumuladoras (hiperacumuladoras), enquanto outras, acumulam em menor grau ou não acumulam (Liu *et al.*, 2024). Segundo esses mesmos autores, as hiperacumuladoras de Se possuem metabolismo robusto, capaz de armazenar níveis extremamente elevados desse micronutriente nos tecidos, como é o caso das espécies *Stanleya pinnata*, *Astragalus bisulcatus*, *Asparagus racemosus* e *Cardamine hupingshanensis*, que são utilizadas em processos de fitorremediação (Hasanuzzaman *et al.*, 2020b). Por outro lado, as plantas não acumuladoras como gramíneas e a maioria das espécies de plantas forrageiras e cultivadas (Mroczek-Zdyrska; Strubińska; Hanaka, 2017), apresentam níveis de Se inferiores a  $30 \text{ mg kg}^{-1}$  (Liu *et al.*, 2024).

A família *Brassicaceae*, entretanto, é promissora para a biofortificação de Se, devido à sua capacidade de acumular quantidades significativamente maiores de enxofre (S) comparativamente a outras plantas e, o que também se reflete na maior acumulação de Se (Hasanuzzaman *et al.*, 2020a). Ademais, culturas de cereais acumulam Se em suas sementes (Hasanuzzaman *et al.*, 2020b), por exemplo a lentilha, que demonstrou resultado satisfatório à adição de fertilizante com baixas doses de Se, embora a resposta varie conforme o genótipo (Thavarajah *et al.*, 2017). Pesquisas indicam que a aplicação de Se pode aumentar sua concentração em partes comestíveis (Choukri *et al.*, 2020) e melhorar o rendimento das sementes (Ekanayake *et al.*, 2015).

Portanto, distinguir o potencial das espécies vegetais em acumular micronutrientes nos tecidos vegetais é essencial para o sucesso de programas de biofortificação, como os focados

em Se. Em países como China, Finlândia, Inglaterra e Nova Zelândia, é uma prática comum, suprir deficiência de Se em produtos agrícolas (Gupta; Gupta, 2017; Izydorczyk *et al.*, 2021; Reis *et al.*, 2018; Somagattu *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2022).

Para promover a segurança alimentar e nutricional, priorizando culturas de alto potencial que garantam alimentos de alta qualidade, socialmente aceitos e sustentáveis, a biofortificação surge como estratégia promissora (Ali; Bhattacharjee, 2023; Sandhu *et al.*, 2023), pois tem por objetivo combater a desnutrição e doenças, além de promover o bem-estar dos grupos populacionais alvo (Siwela *et al.*, 2020). Esta tecnologia, que começou a ser estudada a partir de 1993 (Costa; Santos, 2022), age tanto aumentando a concentração, quanto a biodisponibilidade de nutrientes, ao mesmo tempo em que reduz fatores antinutricionais (Roorkiwal *et al.*, 2021).

A biofortificação acontece por meio de técnicas, isoladas ou combinadas, se apresentando como uma solução simples para fornecer alimentos nutritivos as populações vulneráveis, além de melhorar o rendimento e a lucratividade para os agricultores (Garcia-Casal *et al.*, 2017). Variedades melhoradas representam uma opção valiosa para a qualidade nutricional em regiões afetadas pelas mudanças climáticas, que vêm impactando negativamente a produtividade agrícola e o valor nutricional dos alimentos, especialmente em áreas áridas e de cultivo em sequeiro (Choukri *et al.*, 2020).

A biofortificação com selênio tem sido utilizada como um meio para melhorar à produção de alimentos enriquecidos com esse micronutriente e promover a síntese de metabólitos secundários, que oferecem benefícios à saúde humana quando incluídos na dieta (D'Amato *et al.*, 2020). A lentilha tem se mostrado como cultura modelo em leguminosas para biofortificação em Se, devido seu excelente perfil mineral e níveis favoráveis de fatores que aumentam a biodisponibilidade mineral (Thavarajah *et al.*, 2011, 2015, 2017), melhorando a ingestão global de proteínas, como um "*reforço nutricional*", sendo um importante exemplo de como combater significativamente a fome oculta e distúrbios nutricionais (Kumar *et al.*, 2016; Salaria *et al.*, 2022).

As intervenções são realizadas por meio de abordagens como o melhoramento convencional ou molecular de plantas, engenharia genética e a biofortificação agrônômica (Roorkiwal *et al.*, 2021).

A biofortificação agrônômica envolve a aplicação de fontes minerais externas como método de suplementação e enriquecimento dos vegetais, sendo uma abordagem simples e amplamente adotada em nível global (Sheoran *et al.*, 2022). É um conceito que envolve a adição de nutrientes em partes comestíveis dos vegetais utilizando métodos agrônômicos ou

biotecnológicos (Hasanuzzaman *et al.*, 2020a).

Para Avnee *et al.* (2023), é uma técnica oportuna e de rápida implementação, destinada a enriquecer culturas com micronutrientes como ferro, zinco, iodo e selênio, por meio da fertilização e do manejo do solo, visando à produção de alimentos nutritivos. No entanto, a eficácia dessa técnica depende de fatores como a fonte do fertilizante, o método e a taxa de aplicação, bem como o estágio de desenvolvimento das plantas e a translocação de nutrientes dentro delas (Hasanuzzaman *et al.*, 2020a). Esse processo integra nutrientes em culturas alimentares essenciais, especialmente em cultivares comercialmente aceitas e com desempenho agrônomo superior, que já fazem parte da cadeia alimentar, devido ao seu elevado rendimento de sementes (Sarwar *et al.*, 2020). Algumas pesquisas demonstraram que a biofortificação agrônoma melhora o acúmulo de micronutrientes nas sementes (Roorkiwal *et al.*, 2021; Teklu *et al.*, 2023).

A biofortificação no Brasil tem sido conduzida desde o ano 2000, principalmente pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), que estabeleceu a Rede BioFort, além de iniciativas municipais como o projeto Cooperar e Crescer, voltado para oferta de alimentos biofortificados à população vulnerável. A maioria desses projetos concentra-se em culturas básicas para combater a deficiência de vitamina A, ferro e zinco (Costa; Santos, 2022; Loureiro *et al.*, 2018). Contudo, o país ainda carece de uma legislação específica para biofortificação de alimentos, existindo regulamentação apenas para alimentos fortificados (Loureiro *et al.*, 2018).

Conforme D'amato *et al.* (2020), a biofortificação de plantas expõe ganhos significativos sobre a suplementação direta, especialmente no caso do selênio, visto que o Se inorgânico, ao ser absorvido pelas plantas, é metabolizado em formas orgânicas, que são substancialmente mais biodisponíveis para o organismo humano. No momento atual, a biofortificação agrônoma é considerada um método basilar para elevar artificialmente o teor de selênio nas plantas (Xiao *et al.*, 2024). Procedimentos em biofortificação agrônoma com selênio no solo devem ser executados com rigor, considerando que a disponibilidade desse micronutriente pode variar significativamente, ou ele pode não estar em uma forma facilmente absorvível pelas plantas (Avnee *et al.*, 2023). De acordo com os autores, em solos deficientes, é possível suplementar o selênio por meio da aplicação de fertilizantes à base desse micronutriente, da adição de esterco ou, em especial, através do uso de sementes enriquecidas com selênio. Para D'amato *et al.* (2020), devem-se considerar, também, outros aspectos envolvidos nas estratégias de biofortificação com selênio, como o método de administração do Se, a dosagem aplicada e a forma do fertilizante, além das espécies de culturas, variedades e estágios de crescimento das plantas, entre outros fatores.

No contexto da biofortificação de sementes de leguminosas, os principais métodos empregados são: condicionamento de sementes e, aplicação de fertilizantes via solo e ou via foliar (Shivay *et al.*, 2016; Xiao *et al.*, 2024).

A aplicação foliar com selenato de potássio em cultivares de lentilha resultou em um aumento da concentração de selênio nas sementes (Rahman *et al.*, 2015), já no estudo de Thavarajah *et al.*, (2015), a aplicação foliar de selênio em lentilhas aumentou os parâmetros de biomassa, produtividade de grãos e as concentrações de Se nas sementes em comparação a aplicação via solo; o condicionamento de duas cultivares de lentilha com selênio melhorou as sementes deterioradas (Mehrkish; Ghobadi; Honarmand, 2021).

Na pesquisa de Ekanayake *et al.* (2015), a fertilização via solo com selenito e selenato aumentou a produtividade de grãos de lentilha, com o selenato mostrando-se mais benéfico, proporcionando maior concentração de Se e atividade antioxidante; também suplementando lentilhas com baixo teor de selênio via solo, foi relatado seu efeito protetor ao calor e o estresse hídrico (Sita *et al.*, 2023).

A biofortificação via solo com selênio, pode ser considerada um método relativamente ineficiente devido às perdas substanciais associadas, já a aplicação foliar pode mitigar as interações competitivas no solo, comprometendo sua eficácia, além de reduzir o risco de acúmulo ambiental, visto que pequenas quantidades de selênio são aplicadas (Lyons, 2018). Entretanto, ambos os métodos requerem aplicações contínuas de fertilizante, o que pode ser danoso à saúde do solo (Garcia-Casal *et al.*, 2017). Um dos aspectos fundamentais na biofortificação com selênio é a seleção de métodos adequados para o enriquecimento das culturas com esse micronutriente (Hasanuzzaman *et al.*, 2020a).

O condicionamento de sementes pode ser feito por vários tipos de métodos, sendo eles: *Hidropriming*, *Halopriming*, *Osmopriming* ou Osmocondicionamento, *Biopriming*, *Hormopriming* e o *Nutripriming* (Raj; Raj, 2019). O condicionamento fisiológico ou *priming* representa uma estratégia inteligente, ambientalmente segura e eficaz para melhoria das sementes, viabilizando atributos que favorecem a germinação e o vigor (Raj; Raj, 2019). O condicionamento é um tratamento pré-semeadura que facilita a hidratação controlada das sementes, ativa o metabolismo e inicia o estágio germinativo, sem permitir a protrusão da radícula. Isso assegura a interrupção do processo de germinação por meio da secagem, preservando o efeito estimulante obtido através do tegumento da semente (Yanchenko; Bukharov; Fedosov, 2023).

De acordo com Farooq *et al.* (2019), o *seed priming*, é uma técnica acessível, de baixo custo e alta eficácia. Dentre as modalidades de *priming* destaca-se o *osmopriming*, que consiste

na hidratação controlada em soluções aeradas de polietilenoglicol (PEG) com baixo potencial osmótico (Lei *et al.*, 2021). Outra abordagem complementar é o *nutripriming*, no qual as sementes são embebidas em soluções enriquecidas com macro ou micronutrientes (Farooq *et al.*, 2019). Segundo Farooq *et al.* (2019), ambas as técnicas têm como objetivo principal promover melhorias no desempenho fisiológico e no vigor das plântulas (Farooq *et al.*, 2019).

O *nutripriming* é uma prática que envolve o tratamento das sementes com micronutrientes por imersão em uma solução nutritiva com concentração específica, durante um período de tempo determinado (Shivay *et al.*, 2016). Esse método é caracterizado por sua eficiência em termos de custo, uma vez que requer menor quantidade de nutrientes, além de ser economicamente vantajoso e apresentar benefícios ambientais (Veena; Puthur, 2022).

Para alcançar os resultados desejados, segundo Raj e Raj (2019), é fundamental que os tratamentos sejam conduzidos de acordo com o potencial osmótico da solução, a temperatura e o tempo adequados, assim como, a escolha apropriada dos agentes químicos utilizados.

A concentração e a duração do *nutripriming* também estão entre os fatores primordiais que afetam sua ação, variando de acordo com a cultura e sua composição genética (Veena; Puthur, 2022). Para os autores, é importante conduzir estudos preliminares para estabelecer as concentrações e a duração ideais para maximizar o crescimento, a produtividade e a qualidade das culturas.

Conforme Raj e Raj (2019) o *priming* ativa importantes processos metabólicos pré-germinativos, como os mecanismos de reparo de membranas, mitocôndrias e DNA, a síntese de DNA, RNA e mitocôndrias, o desenvolvimento de embriões imaturos, além de promover a superação da dormência; sem que a germinação ocorra, seguido de uma secagem até que as sementes retornem ao teor de umidade inicial, possibilitando o manuseio adequado (Farooq *et al.*, 2019; Romeu *et al.*, 2021). Em função disso, o condicionamento oferece diversas vantagens, incluindo o melhoramento do estabelecimento de estandes e populações de plantas, uniformidade de germinação, ganho de desempenho em velocidade de germinação, tempo médio de germinação, índice de germinação, índice de taxa de germinação, vigor das plântulas, rendimentos econômicos, e maior resistência a estresses bióticos e abióticos (Raj; Raj, 2019). Além disso, essa técnica prolonga a resistência de sementes de baixo vigor e é eficaz para fornecimento de micronutrientes durante o plantio. Entretanto, a ampla adaptação comercial do condicionamento enfrenta desafios, como a longevidade das sementes após o tratamento, principalmente em condições de armazenamento e a carência de pesquisas sobre materiais de embalagens herméticas para armazenamento prolongado (Farooq *et al.*, 2019).

Farooq *et al.* (2019) também relataram que a preparação das sementes por meio deste

processo facilita o metabolismo, promovendo a síntese proteica e enzimática, a ativação  $\alpha$  e  $\beta$ -amilase, degradação do isocitrato, síntese de novo mRNA, manutenção da integridade do DNA, aumento da carga energética e da capacidade de ATP, e elevação do conteúdo nuclear de DNA. Isso facilita a transição do ciclo celular da fase G1 para G2, promovendo uma germinação sincronizada. A taxa fotossintética (P/S) também é aumentada, graças à absorção eficiente de nutrientes e a melhor utilização da radiação fotossinteticamente ativa (Farooq *et al.*, 2019). O condicionamento ativa precocemente os sistemas antioxidantes, que protegem membranas, lipídios e proteínas contra estresses abióticos, como salinidade e seca. Esse aumento na taxa fotossintética leva a maior carboxilação, promovendo crescimento e desenvolvimento, o que em última análise melhora o rendimento das culturas e o índice de colheita (Raj; Raj, 2019).

A utilização do *nutripriming* com selênio é uma metodologia inovadora e ambientalmente sustentável, destinada a aprimorar a fisiologia das sementes em resposta a condições ambientais adversas (Mansoor *et al.*, 2024). O interesse atual concentrou-se na bioconversão do selênio inorgânico, particularmente nas formas de selenito ( $\text{SeO}_3^{2-}$ ) e selenato ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ), em derivados orgânicos metabolizados pelas plantas (Ekumah *et al.*, 2021). Para Hasanuzzaman *et al.* (2020), a escolha da forma química é essencial para o sucesso da biofortificação. Evidências na literatura sugerem os potenciais benefícios às plantas em algumas culturas em sementes biofortificadas com selenato e/ou selenito de sódio, como: quinoa (Raza *et al.*, 2024), feijão (Mansoor *et al.*, 2024), camelina e canola (Ahmad *et al.*, 2021), arroz (Hu *et al.*, 2022a) e nabo (Hussain *et al.*, 2023).

Enfim, a implantação e o consumo de variedades biofortificadas têm demonstrado benefícios à saúde humana, entretanto, a avaliação de seu impacto ainda enfrenta desafios significativos. Isso se deve à dificuldade em estabelecer padrões que considerem a ampla diversidade de culturas, as necessidades regionais específicas e à falta de estudos que acumulem evidências robustas sobre o impacto positivo dessas variedades na melhoria do status de micronutrientes em humanos (Sheoran *et al.*, 2022).

Garcia-Casal *et al.* (2017) identificaram diversos pontos críticos, incluindo a falta ou inexistência de considerações regulatórias; a necessidade de qualificação e gerenciamento adequados dos processos de biofortificação de sementes, e a necessidade de estratégias de *marketing* para promover a aceitação e a implementação pública dessas tecnologias como uma estratégia de saúde para a prevenção da deficiência de micronutrientes. Além disso, um desafio adicional é a ausência de regulamentações sistemáticas para a fertilização de plantas com selênio (Izydorczyk *et al.*, 2021).

### 2.3 Germinação e o transporte de selênio em plântulas

O conhecimento da fisiologia dos nutrientes é fundamental para compreender sua biodisponibilidade e garantir sua distribuição adequada durante o desenvolvimento inicial nas sementes de leguminosas (Roorkiwal *et al.*, 2021). Compreender o modo de aquisição, transporte e acúmulo de minerais (Roorkiwal *et al.*, 2021) é essencial para apoiar critérios de adubação mais eficientes, assegurando a disponibilização dos nutrientes nos momentos de maior necessidade (Romeu *et al.*, 2021).

De acordo com Romeu *et al.* (2021), a nutrição das plantas inicia-se durante o processo germinativo das sementes, sendo mediada pela absorção de água. De forma resumida, os eventos característicos desse processo trifásico incluem: uma fase inicial de rápida absorção de água, seguida por um período de estabilização e, finalizando com uma nova fase de rápida absorção após a germinação, que culmina no alongamento do eixo embrionário (Devika *et al.*, 2021). Concomitantemente, ocorrem uma série de eventos bioquímicos, como os descritos anteriormente, além de alongamento e divisão celular e mobilização das reservas de armazenamento (Devika *et al.*, 2021; Romeu *et al.*, 2021). Para Wolny *et al.* (2018), a segunda fase é considerada a mais relevante, pois está relacionada a diversos eventos celulares e bioquímicos, ou seja, uma intensa atividade metabólica e celular acontecendo dentro das sementes.

Durante o processo germinativo ocorrem mudanças morfológicas na semente, após a embebição e protrusão da radícula, promovendo a diluição progressiva dos tecidos cotiledonares com a presença de micronutrientes no eixo do embrião, especialmente na ponta da radícula (Romeu *et al.*, 2021). A germinação, desencadeada pela embebição, ativa a hidrólise dos nutrientes armazenados (Ohanenye *et al.*, 2020). Nesse contexto, Liu *et al.* (2022) afirmaram que as enzimas inativas são ativadas durante o processo de germinação, promovendo o catabolismo das reservas armazenadas e simultaneamente o conteúdo de antinutrientes, como o ácido fítico e taninos, pode ser reduzido em função da hidrólise. Assim, o processo de germinação pode potencializar os valores nutricionais e bioativos das sementes comestíveis, amplificando seus efeitos antioxidantes (Gan *et al.*, 2017a) e a redução dos fatores antinutricionais (Liu *et al.*, 2019). Portanto, a germinação é reconhecida como um processo seletivo e eficaz para o enriquecimento de compostos bioativos nas sementes (Liu *et al.*, 2022).

Sementes comestíveis germinadas e plântulas apresentam um aumento gradual no acúmulo de compostos fenólicos solúveis comparativamente sementes não germinadas (Gan *et al.*, 2017a).

Quimicamente, os polifenóis são compostos aromáticos que contêm pelo menos uma unidade de fenol, podendo estar presentes em formas livres ou ligadas a açúcares e proteínas, como ocorre nas leguminosas (Gan *et al.*, 2017a). Esses compostos são importantes metabólitos secundários, conforme destacado por Liu *et al.* (2019), que protegem as plantas de estresses bióticos e abióticos, particularmente na redução das espécies reativas de oxigênio (ROS) (Świeca; Baraniak, 2014).

A germinação promove o desenvolvimento de novas paredes celulares, e como os compostos fenólicos estão associados a essas estruturas, ocorre gradualmente a síntese de novos fenólicos, destacando-se os ácidos fenólicos e os flavonóides (Gan *et al.*, 2017a). Os polifenóis liberados durante a germinação prolongada são convertidos em frações fenólicas solúveis, tanto livres quanto ligadas, que exercem um efeito protetor ou antioxidante, atuando contra a peroxidação lipídica (Xu *et al.*, 2018). As variações nas atividades antioxidantes podem ser atribuídas às mudanças na concentração de antioxidantes, como os compostos fenólicos e carotenoides (Liu *et al.*, 2019).

Outra característica do processo germinativo é o incremento de peptídeos bioativos que ocorre pela hidrólise de proteínas melhorando assim a biodisponibilidade dos nutrientes (Liu *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022), como também aumento das enzimas fitases que potencializam a hidrólise do ácido fítico, liberando fosfato (Zhang *et al.*, 2022).

Em lentilhas submetidas a diferentes condições de iluminação, observou-se que o processo de germinação resultou em aumento relativo da atividade antioxidante, porém, redução no teor de compostos fenólicos (Aguilera *et al.*, 2014). Além disso, o *priming* com silício (Ceritoglu *et al.*, 2023), bem como com ácido salicílico e peróxido de hidrogênio (Bouallègue *et al.*, 2019) promoveu a melhoria na germinação das lentilhas, associada à ativação do sistema de defesa antioxidante.

Observou-se que as várias formas de Se podem ser encontradas em várias camadas de sementes (Khan *et al.*, 2023) e nas células vegetais, onde são assimiladas na forma de metabólitos secundários (Hu *et al.*, 2022b).

A presença de antioxidantes de baixo peso molecular, como ascorbato, glutatona, prolina e compostos fenólicos, tem sido associada ao Se, uma vez que este micronutriente estimula e potencializa a atividade enzimática da superóxido dismutase, catalase, ascorbato peroxidase, glutatona peroxidase e peroxidase (Skrypnik *et al.*, 2022). Da mesma forma, o selênio pode melhorar a germinação e a eficiência da atividade antioxidante e clorofila total das plântulas como foi observado em arroz (Hu *et al.*, 2022a; Khaliq *et al.*, 2015), pimenta jalapeño (Sariñana-Navarrete *et al.*, 2024) e tomate (Mejía-Ramírez *et al.*, 2023). Entretanto, as

pesquisas sobre a ação do Se no acúmulo de metabólitos secundários apresentam resultados divergentes e controversos (Skrypnik *et al.*, 2022), enquanto alguns apontam efeitos positivos, outras investigações apontam para efeitos negativos ou, em alguns casos, ausência de impacto no acúmulo de metabólitos.

É postulado que o transporte das fontes de selênio, selenato ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ) e selenito ( $\text{SeO}_3^{2-}$ ), ocorre no xilema e no floema, direcionando-se para as folhas e grãos, por meio de dois mecanismos principais (Khan *et al.*, 2023; Sors; Ellis; Salt, 2005).

O selenato é absorvido pelos mesmos transportadores de sulfato, de maneira semelhante ao enxofre (S) seguindo o modelo de *Arabidopsis* (*Arabidopsis thaliana* [L.] Heynh) (Takahashi *et al.*, 2011), o que gera uma competitividade que pode limitar a presença de selenato em condições de altos níveis de enxofre (Malagoli *et al.*, 2015; Sors; Ellis; Salt, 2005; Trippe; Pilon-Smits, 2021). Os transportadores de sulfato como AtSULTR2;1, AtSULTR2;2 e AtSULTR3;5 desempenham papel fundamental no transporte direto do selenato para as células da parte aérea, além de auxiliar no carregamento no xilema das plantas (Khan *et al.*, 2023; Trippe; Pilon-Smits, 2021; White; Neugebauer, 2019). No floema o selênio é distribuído como selenato e compostos organosselênicos, como selenometionina (SeMet) e Se-metilselenocisteína, sendo catalisado e captado pela AtSULTR1;3, e as proteínas de transporte AT SULTR4;1 e AtSULTR4;2 catalisam o fluxo de selenato para os vacúolos (Skrypnik *et al.*, 2022; Takahashi *et al.*, 2011; White; Neugebauer, 2019) e nos cloroplastos é assimilado nas formas orgânicas de Se pela AtSULTR3; 1 (Cao *et al.*, 2013).

Já o selenito é transportado por aquaporinas (NIP2;1) (Khan *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2014) e, também é absorvido pelos transportadores de fosfato PT2 e PT8 (Khan *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2014), sendo rapidamente convertido nas formas orgânicas de selênio (White; Neugebauer, 2019). A especiação do Se nas plantas é influenciada pela forma sob a qual o Se é disponibilizado para o vegetal (Huang *et al.*, 2017). Como o Se é quimicamente similar ao S, sendo por isso acumulado em maior ou menor grau por todas as plantas em todas as suas partes, a acumulação de Se nas espécies vegetais está correlacionada com os níveis de expressão dos transportadores de sulfato, além da presença e atividade de diversas enzimas metabólicas que atuam tanto sobre o S quanto sobre o Se (Malagoli *et al.*, 2015).

Resumidamente, o selenato absorvido é subsequentemente reduzido a selenito, um processo mediado pela enzima ATP-sulfurilase (APS), conforme segue a via de assimilação do sulfato dentro dos plastídios (Khan *et al.*, 2023; Malagoli *et al.*, 2015; Sors; Ellis; Salt, 2005; Trippe; Pilon-Smits, 2021), para formar adenosina 5'-fosfoselenato (APSe), que é então reduzido a selenito pela adenosina 5'-fosfossulfato redutase (APR) usando glutatona reduzida

(GSH) como doadora de elétrons (Schiavon *et al.*, 2015; White; Neugebauer, 2019). Depois o selenito é reduzido a seleneto ( $\text{Se}^{2-}$ ) auxiliado pelas enzimas sulfito redutase (SiR), bem como pelos mecanismos envolvendo glutatona ou glutaredoxinas (Gupta; Gupta, 2017; Khan *et al.*, 2023; Trippe; Pilon-Smits, 2021; Wallenberg *et al.*, 2010).

O seleneto é, então, assimilado e convertido em formas orgânicas, como a selenocisteína (SeCys), sendo o processo mediado pela enzima cisteína sintase (SAT), que catalisa a incorporação do selênio nessas moléculas. Subsequentemente, essas formas orgânicas podem ser transformadas em selênio elementar ( $\text{Se}^0$ ), metil-selênio (Me-selênio) ou selenometionina (SeMet) (Khan *et al.*, 2023; Malagoli *et al.*, 2015; Sors; Ellis; Salt, 2005).

Os aminoácidos transportados pela proteína AAP1, auxiliam na absorção das formas orgânicas de Se pelas raízes das plantas, facilitando seu transporte subsequente para os grãos (Khan *et al.*, 2023).

Diversas plantas acumulam Se como SeCys ou SeMet, dois aminoácidos que são incorporados às proteínas (Skrypnik *et al.*, 2022). Contudo, quando esses compostos são incorporados às proteínas por meio da substituição de aminoácidos convencionais por Se-aminoácidos, podem comprometer a atividade proteica, resultando em disfunções fisiológicas (White; Neugebauer, 2019).

Ambas as formas de Se apresentam diferenças em sua acumulação nas plantas, mesmo após serem convertidas, com o selenito acumulando-se nas raízes e o selenato sendo transportado para a parte aérea via xilema (Gupta; Gupta, 2017; Huang *et al.*, 2017) e em condições de excesso de selênio no ambiente, o armazenamento de selenato acontece nos vacúolos das células foliares (Skrypnik *et al.*, 2022). O selenito é rapidamente convertido em formas orgânicas (Huang *et al.*, 2017; Trippe; Pilon-Smits, 2021), ao passo que o selenato é convertido em selenito e espécies de organoselênio em quantidades menores (Huang *et al.*, 2017). Entretanto, o selenato absorvido pode seguir diretamente para os brotos sem sofrer qualquer especiação, utilizando transportadores de sulfato onde é metabolizado nos cloroplastos por meio da via de assimilação do enxofre (Sors; Ellis; Salt, 2005).

Segundo Huang *et al.* (2017), o selenato pode ser distribuído por toda a planta, sendo encontrado em diferentes órgãos vegetais. A presença de ânions, como sulfato e fosfato, nos tecidos vegetais também pode influenciar as preferências de absorção de Se das plantas, competindo pelos mesmos transportadores ou modulando as vias de assimilação de nutrientes (Sarwar *et al.*, 2020).

Já os selenocompostos formados nas plantas variam em toxicidade e valor nutricional, sendo que as formas orgânicas parecem ser mais eficazes na biofortificação de Se. Por isso, é

crucial identificar as formas de Se presentes nas plantas para orientar a suplementação nutricional, garantindo a formação de compostos de Se mais nutritivos em culturas agrícolas e elevando os níveis de enzimas essenciais (Malagoli *et al.*, 2015).

Outro aspecto relevante é o metabolismo do nitrogênio, estritamente associada ao S, que é induzido pelo Se, resultando na produção de fitoquímicos secundários de S com valor nutricional, os glucosinolatos (GLS). Esses mecanismos interligados promovem, por ação do Se, uma síntese adicional de proteínas, aminoácidos como metionina, fenilalanina (Phe), tirosina (Tyr) e triptofano (Trp) (precursores dos GLS), e compostos secundários contendo nitrogênio, como os fenólicos que desempenham papel importante na defesa das plantas contra radicais livres (Malagoli *et al.*, 2015).

A biofortificação visa aumentar a absorção das formas de Se, estimulando a melhoria da tolerância das plantas ou até mesmo o desenvolvimento de acúmulos específicos de Se em seus tecidos. Entretanto, há carência de estudos que investiguem os processos de transporte e metabolismo de Se nas plantas, os quais demandam conhecimento mais aprofundado para sua compreensão (Trippe; Pilon-Smits, 2021).

## 2.4 Microverdes

Os microverdes, também conhecidos como alimentos emergentes, popularmente chamados de "baby greens" ou "microgreens" (Bhaswant *et al.*, 2023), são plantas juvenis, porém em um estágio mais desenvolvido que os brotos (Choe; Yu; Wang, 2018; Sharma *et al.*, 2022). De maneira contrária a brotos e verduras, são colhidos sem a presença de raízes (Bezerra *et al.*, 2022; Choe; Yu; Wang, 2018), possuem sabor mais acentuado e são mais ricos em nutrientes (Sharma *et al.*, 2022).

Outra diferenciação, é em relação as folhas cotiledonares, nos microverdes elas são desenvolvidas, portanto, apresentam cores, texturas e sabores, já nos brotos, elas ainda estão em desenvolvimento (Sharma *et al.*, 2022). Segundo Galieni *et al.* (2020), são vegetais que exigem requisitos mínimos em termos de equipamentos e suprimentos, além de serem produzidos de maneira célere, econômica e fácil. Esses vegetais tenros e imaturos (Ebert, 2022), possuem pequeno porte, sabores distintos, textura delicada, alta concentração de fitonutrientes e cores vivas. A comercialização e o consumo desses alimentos ocorrem *in natura*, com o propósito de preservar seu alto valor nutricional e sabor, além de manter os benefícios oferecidos, uma vez que não há alteração em seus constituintes químicos, garantindo assim a qualidade para os consumidores finais (Sharma *et al.*, 2022).

Como alimento funcional, fornece elementos nutricionais excepcionais (Bhaswant *et al.*, 2023), apresentando concentração de nutrientes até 40 vezes maior em comparação com vegetais maduros, tornando-se fonte nutricional altamente densa e eficiente (Bezerra *et al.*, 2022; Lemmens *et al.*, 2019). Segundo Bhaswant *et al.* (2023), em virtude da presença de diversos fitonutrientes com propriedades benéficas à saúde, esses alimentos podem ser considerados "superalimentos", desempenhando papel importante tanto na prevenção quanto no combate de enfermidades, como desnutrição, obesidade, diabetes, câncer, entre outras. Portanto, surgem como fontes alimentares para enriquecer as dietas, aprimorando a qualidade nutricional e promovendo saúde (Zhang *et al.*, 2021).

Como plântulas, apresentam folhas cotiledonares, podendo ou não exibir o primeiro par de folhas expandidas e tenras (Bhaswant *et al.*, 2023), juntamente com o caule emergindo acima das raízes e da superfície do solo (Sharma *et al.*, 2022). Seu cultivo é relativamente fácil e rápido, com um ciclo de produção relativamente curto, variando entre 7 a 21 dias, dependendo da espécie e do método de cultivo adotado (Riggio *et al.*, 2019; Sharma *et al.*, 2022). Normalmente, possuem altura entre 2 e 8 cm, distinguindo-se por suas características sensoriais marcantes, como sabor pronunciado, textura diferenciada, aroma singular, aparência atrativa e coloração exótica, apesar de suas dimensões reduzidas (Bhaswant *et al.*, 2023).

Diferentes variedades de microverdes podem ser cultivadas em pequena ou grande escala, desde que as sementes utilizadas sejam de qualidade, apresentem alto potencial germinativo, sejam seguras para consumo e estejam disponíveis durante todo o ano, sem a necessidade de condições específicas para o seu cultivo, como espécies da família *Fabaceae*, a qual inclui a lentilha (Bhaswant *et al.*, 2023; Ebert, 2022; Sharma *et al.*, 2022).

A lentilha é reconhecida como fonte relevante para produção de microverdes, destacando-se pelo fácil cultivo e baixo custo, porém a diversidade de seus fitonutrientes ainda é pouco explorada na literatura científica (Priti *et al.*, 2021).

Em termos nutricionais, além dos macros e micronutrientes podemos citar ainda antioxidantes fenólicos, carotenoides, antocianinas, glucosinolatos em altos teores (Bhaswant *et al.*, 2023), uma das principais razões para o grande interesse nos microverdes, ou seja, seu perfil nutricional excepcional (Sharma *et al.*, 2022).

Durante o processo germinativo, também conhecido como fase heterotrófica, conforme descrito por Bhaswant *et al.* (2024), ocorre a mobilização das reservas armazenadas nas sementes, as quais são degradadas e transportadas para geração de energia, essencial ao crescimento dos microverdes, por possuírem alta demanda metabólica. Esse estágio, que abrange a germinação até o desenvolvimento da plântula, é fundamental para o fornecimento de nutrientes, como destacado

no estudo da perilla verde (*Perilla frutescens* var. *crispa* f. *viridis*), no qual foi observado maior concentração de carotenoides, clorofilas a e b, além de polifenóis com propriedades antioxidantes (Bhaswant *et al.*, 2024).

Segundo Ebert (2022), os microverdes apresentam aumento significativo no acúmulo de clorofila e compostos fenólicos com propriedades antioxidantes, quando comparados aos brotos, além disso, tendem a ter concentrações de carotenoides superiores às dos vegetais maduros. Os microverdes podem ser considerados excelente fonte de fitoquímicos, como carotenoides e fenólicos (Choe; Yu; Wang, 2018; Zhang *et al.*, 2021), auxiliando na prevenção de diabetes e na modulação da atividade colinérgica (Wojdyło *et al.*, 2022) . Entretanto, a presença desses compostos bioativos é inerente a cada espécie vegetal, manifestando-se em estágios específicos (Abaajeh; Kingston; Harty, 2023).

O perfil fitoquímico é capaz de ser potencializado por meio de estratégias de biofortificação. Sharma *et al.* (2023), relataram que a biofortificação acentua o teor de nutrientes, promove o desenvolvimento e amplia a vida útil dos microverdes. Nesse sentido, a biofortificação se torna um tema intrigante (Galieni *et al.*, 2020), além de aumentar os micronutrientes promotores de saúde nos tecidos vegetais, também promove o efeito de elicitação de metabólitos secundários, resultando em melhoria significativa do valor nutricional desses vegetais.

Dessa forma, a biofortificação desses alimentos com pequenas adições de Se apresenta-se como oportunidade para culturas de rápido crescimento (Newman *et al.*, 2021), aprimorando seu valor nutracêutico (Pannico *et al.*, 2020).

O cultivo de microverdes de lentilha e feijão-mungo sob diferentes condições de altitude revelou intensificação nos parâmetros de composição fitoquímica, nas capacidades antioxidantes e no conteúdo de nutrientes (Priti *et al.*, 2021). Outros exemplos relevantes podem ser observados na Tabela 2, onde a biofortificação com selenato e/ou selenito de sódio demonstraram potenciais benefícios à saúde em diversos tipos de microverdes comestíveis, ampliando ainda mais seu valor nutricional.

Quadro 2 - Biofortificação com selenato e/ou selenito de sódio e seus potenciais benefícios a saúde em vários tipos de microverdes comestíveis.

Microverdes comestíveis	Fonte de selênio e via de suplementação	Efeito no rendimento e/ou biomassa	Efeitos no conteúdo fenólico total (TPC), capacidade antioxidante total (ORAC/TAC), capacidade de redução férrica do Plasma (FRAP) ou metabólitos	Referência
<b>Cebolinha</b> ( <i>Allium fistulosum</i> L.)	Selenato de sódio em condições hidropônicas.	Rendimento reduzido na concentração 10,0 mg L <sup>-1</sup> , mas não foi afetado com 5,0 mg L <sup>-1</sup> de Se.	Maior TPC e ORAC no tratamento com 10,0 mg L <sup>-1</sup> de Se.	(Newman <i>et al.</i> , 2021)
<b>Manjericão</b> ( <i>Ocimum basilicum</i> L.)	Selenato de sódio em condições hidropônicas.	Diminuiu o rendimento na concentração de 5,0 mg L <sup>-1</sup> de Se.	Maior TPC no tratamento com 5,0 mg L <sup>-1</sup> de Se. Maior ORAC no tratamento com 10,0 mg L <sup>-1</sup> de Se.	(Newman <i>et al.</i> , 2021)
<b>Coentro</b> ( <i>Coriandrum sativum</i> L.)	Selenato de sódio em condições hidropônicas.	Rendimento não foi afetado pelas concentrações de Se.	Maior TPC no tratamento com 5,0 mg L <sup>-1</sup> de Se. Maior TPC e ORAC no tratamento com 10,0 mg L <sup>-1</sup> de Se.	(Newman <i>et al.</i> , 2021)
<b>Trigo sarraceno</b> ( <i>Fagopyrum esculentum</i> )	Embebição de sementes em soluções com selenato e selenito de sódio.	Reduziu o rendimento em quase 30% em qualquer uma das formas de Se.	Aumentou conteúdos de clorofilas a ou b ou de carotenoides.	(Germ <i>et al.</i> , 2019)
<b>Manjericão doce</b> ( <i>Ocimum basilicum</i> L.)	Selenato de sódio em condições hidropônicas.	Não houve alteração significativa na massa seca.	Maior FRAP em ambos os tratamentos com Se.	(Puccinelli <i>et al.</i> , 2019)

<b>Trigo branco de inverno</b> ( <i>Triticum aestivum L.</i> )	Selenito de sódio em condições hidropônicas.	Reduziu o rendimento.	Aumentou conteúdos de clorofilas a ou b ou de carotenoides. Maior TPC no tratamento com 0,25 mg L <sup>-1</sup> de Se.	(Islam <i>et al.</i> , 2020)
<b>Couve</b> ( <i>Brassica oleracea L. var. sabellica</i> )	Exposição a selenito e selenato de sódio (1:1, v:v).	Não houve alteração do rendimento.	Os conteúdos de clorofilas a, b, total ou de carotenoides não foram alterados pelo tratamento com Se. O tratamento com Se não alterou a TPC.	(Viltres-Portales <i>et al.</i> , 2024)
<b>Couve-rábano</b> ( <i>Brassica oleracea L. var. gongylodes</i> )	Exposição a selenito e selenato de sódio (1:1, v:v).	Não houve alteração do rendimento.	Aumentou o conteúdo de carotenoides, mas clorofilas a, b ou total não foram alteradas pelo tratamento com Se. O tratamento com Se não alterou a TPC.	(Viltres-Portales <i>et al.</i> , 2024)
<b>Trigo</b> ( <i>Triticum aestivum L.</i> )	Exposição a selenito e selenato de sódio (1:1, v:v).	Não houve alteração do rendimento.	Aumentou o conteúdo de clorofila a, mas clorofilas b e total ou carotenoides não foram alterados pelo tratamento com Se. O tratamento com Se não alterou a TPC.	(Viltres-Portales <i>et al.</i> , 2024)
<b>Rumex acetosa L.</b>	Plantas regadas com selenato de sódio.	Não houve alteração do rendimento.	Diminuiu o conteúdo de clorofila total ou de carotenoides. O tratamento com Se aumentou a FRAP, fenólicos e flavonoides.	(Puccinelli <i>et al.</i> , 2021)
<b>Plantago coronopus L.</b>	Plantas regadas com selenato de sódio.	Não houve alteração do rendimento.	Aumentou o conteúdo de clorofila total ou carotenoides. O tratamento com Se aumentou a FRAP, fenólicos e flavonoides.	(Puccinelli <i>et al.</i> , 2021)

<b><i>Portulaca oleracea L.</i></b>	Plantas regadas com selenato de sódio.	Não houve alteração do rendimento.	Aumentou o conteúdo de clorofila total ou carotenoides. O tratamento com Se aumentou a FRAP e fenólicos, mas não alterou os flavonoides.	(Puccinelli <i>et al.</i> , 2021)
<b>Rabanete vermelho (<i>R. sativus var. vulcano</i>)</b>	Selenito e selenato de sódio combinados (1:1) em condições hidropônicas.	Não houve alteração significativa na massa seca.	Não ocorreram alterações significativas nos pigmentos analisados. O tratamento com Se reduziu a TPC e TAC.	(García-Tenesaca <i>et al.</i> , 2023)
<b>Ervilha verde (<i>P. sativum var. balboa</i>)</b>	Selenito e selenato de sódio combinados (1:1) em condições hidropônicas.	Não houve alteração significativa na massa seca.	Aumentou o conteúdo de clorofilas a, total ou carotenoides. O tratamento com Se não alterou a TPC e TAC.	(García-Tenesaca <i>et al.</i> , 2023)
<b>Alfafa (<i>M. sativa var. victoria</i>)</b>	Selenito e selenato de sódio combinados (1:1) em condições hidropônicas.	Não houve alteração significativa na massa seca.	Não ocorreu alteração nos carotenoides, mas reduziu o conteúdo de clorofilas a, b e total. O tratamento com Se não alterou a TPC e TAC.	(García-Tenesaca <i>et al.</i> , 2023)

Em relação ao processo de biofortificação com Se, é importante considerar o estágio de crescimento, a parte comestível da planta, porque as formas de Se podem se acumular de maneira diferente (D'amato *et al.*, 2020).

A produção de microverdes caracteriza-se por sua simplicidade e baixo impacto ambiental, o que os posiciona como uma opção sustentável no contexto agrícola (Choe; Yu; Wang, 2018).

Os microverdes podem ser produzidos em uma diversidade de meios e ambientes (Bhaswant *et al.*, 2023), como fibra de coco, areia, vermiculita (Priti *et al.*, 2022), além de turfa, perlita, tapete de fibra têxtil, tapete biodegradável contendo juta, rocha e lãs (Sharma *et al.*, 2022).

Esses cultivos podem ocorrer tanto em ambientes como hortas domésticas e quintais quanto em ambientes internos (Sharma *et al.*, 2022), ou até mesmo em espaços limitados (Priti *et al.*, 2022).

Apesar de sua produção comercial ser realizada sob condições parcialmente controladas e em uma variedade de substratos, a falta de padronização no cultivo afeta negativamente o rendimento geral dos microverdes (Priti *et al.*, 2022). Em estudo conduzido por Priti *et al.* (2022), o meio composto por fibra de coco, vermiculita e areia, na proporção de 2:1:1, demonstrou melhor capacidade de retenção de água para o cultivo de microverdes de lentilha, feijão-mungo e mostarda indiana.

Quanto ao cultivo, os microvegetais podem ser produzidos em bandejas dentro de casas de vegetação com iluminação artificial em ambientes controlados (Riggio *et al.*, 2019). No entanto, é necessário atenção à taxa de semeadura, a fim de evitar a competição entre as plantas (Choe; Yu; Wang, 2018), embora a recomendação de uma densidade de semeadura ideal ainda apresente dificuldades (Treadwell *et al.*, 2020). Para Bonato; Nagel; Sommer, (2022), a densidade de semeadura pode oscilar entre 1 e 4 sementes por cm<sup>2</sup>, sendo determinada por fatores como peso das sementes, taxa de germinação e população almejada.

No que diz respeito à adubação, segundo Treadwell *et al.*, (2020), esta não é considerada necessária, uma vez que os nutrientes armazenados nas sementes são suficientes para suprir as necessidades durante o desenvolvimento inicial das plantas. De modo geral, o controle dos fatores ambientais, como temperatura, umidade, fotoperíodo e adubação, são essenciais para garantir o adequado desenvolvimento dos microverdes (Abaajeh; Kingston; Harty, 2023).

Por fim, a colheita, ocorre quando a planta atinge a altura ideal e o primeiro par de folhas verdadeiras se desenvolve (Sharma *et al.*, 2022), compreendendo caule, cotilédones expandidos e as folhas jovens verdadeiras (Choe; Yu; Wang, 2018). O processo de colheita pode ser realizado de forma manual ou mecanizada, através do corte do caule logo acima do substrato (Kyriacou *et al.*, 2016). No caso específico das lentilhas, a colheita é recomendada no nono dia após a semeadura (Priti *et al.*, 2021, 2022).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento consistiu em dois ensaios, sendo o Ensaio 1, o efeito do condicionamento fisiológico sobre a qualidade de sementes e, o Ensaio 2, o cultivo de microverdes para determinação dos parâmetros de produtividade, mineral, fitoquímicos e atividade antioxidante.

#### 3.1. Obtenção das sementes de lentilha

Para instalação dos ensaios, foram utilizadas sementes de lentilha da cultivar BRS Mimi (Embrapa Hortaliças, 2014) produzida em 2023 e disponibilizadas, pela Embrapa Hortaliças, Brasília – DF. Assim que foram recebidas, permaneceram acondicionadas em câmara fria a  $10 \pm 2^\circ\text{C}$  e a 60% UR durante todo o período experimental.

#### 3.2. Local e delineamento experimental

Ambos ensaios foram instalados e conduzidos no Laboratório de Sementes (LASEM), da Universidade Federal de Uberlândia – UFU, campus Umuarama. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com quatro repetições. Composto por um fatorial  $2 \times 5$ , sendo: duas fontes de selênio [selenato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ ) e selenito de sódio ( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ )] e 5 concentrações (0, 1, 5, 10 e  $20 \text{ mg L}^{-1}$ ).

#### 3.3. Caracterização da qualidade inicial das sementes

Preliminarmente, as sementes foram submetidas a caracterização da qualidade inicial por meio dos testes de teor de água e germinação (Brasil, 2009), emergência e massa seca de plântulas (Kryzanowski *et al.*, 2020), obtendo os resultados da Tabela 3.

Tabela 1 - Caracterização inicial da qualidade fisiológica de sementes de lentilha da cultivar BRS Mimi por meio dos testes de teor de água (%), germinação (%), emergência (%) e massa seca total ( $\text{mg plântula}^{-1}$ ).

Cultivar	Teor de água	Germinação	Emergência	Massa Seca
Brs Mimi	9,2	71	93	1,10

Fonte: o próprio autor

### 3.4. Osmocondicionamento

Após a caracterização da qualidade fisiológica, as sementes passaram pelo processo de osmocondicionamento. Para tanto, foram preparadas soluções com água destilada e polietilenoglicol com peso molecular de 6000 (PEG 6000) no potencial  $-0,8$  MPa (Ghassemi-Golezani *et al.*, 2008). Assim, foram solubilizados  $251,028 \text{ g.L}^{-1}$  de PEG 6000 sendo a concentração da solução definida conforme Villela *et al.* (1991). Posteriormente, foram adicionadas as fontes de sal de selênio que consistiam em selenato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ ) da Sigma-Aldrich com grau de pureza de 95%; e selenito de sódio ( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ) da Êxodo com grau de pureza de 98,5%. As concentrações utilizadas em cada formulação foram de 1, 5, 10 e  $20 \text{ mg L}^{-1}$  (Lapaz *et al.*, 2019). O controle consistiu em sementes apenas osmocondicionadas com PEG 6000.

As sementes permaneceram em imersão nas respectivas soluções osmóticas em frascos Erlenmeyer (500 mL), vedados com plástico filme e conectados a uma bomba de ar comprimido com mangueiras plásticas para promover a aeração artificial da solução. O sistema foi mantido em incubadora BOD a  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  por 12 horas, na ausência de luz.

Finalizado o condicionamento fisiológico, as sementes foram lavadas em água corrente para remover a solução aderida ao tegumento, sendo o excesso de água retirado com auxílio de papel toalha e por fim secas ao ar ambiente por 72 horas até retornar ao seu teor de água inicial.

Concluída essa etapa, as sementes osmocondicionadas foram submetidas aos diferentes ensaios.

### 3.5. Ensaio 1 - Efeito do condicionamento fisiológico sobre a qualidade de sementes

#### 3.5.1. Determinação do teor de água

Determinado pelo método de estufa a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  por 24 horas, aplicado sob duas repetições de  $4,5 \pm 5 \text{ g}$  de sementes, sendo o resultado expresso em porcentagem, segundo as Regras para Análises de Sementes - RAS (Brasil, 2009).

#### 3.5.2. Teste de Germinação

Conduzido com quatro repetições de 50 sementes semeadas em papel de germinação umedecido com água na proporção de 2,5 vezes o peso do substrato seco. Após a semeadura, foram confeccionados rolos e acondicionados em sacos plásticos. Os rolos ficaram dispostos em câmara climatizada tipo demanda bioquímica de oxigênio (B.O.D.) a  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  na presença de 12 horas de luz. As avaliações aconteceram no quinto e no décimo dia após a semeadura e

os resultados foram expressos em porcentagem de germinação plântulas, conforme as Regras para Análise de Sementes (RAS) (Brasil, 2009).

### **3.5.3. Primeira contagem de germinação**

O teste foi conduzido simultaneamente ao teste de germinação, sendo avaliada, no quinto dia, a porcentagem de plântulas na primeira contagem de germinação, conforme os critérios estabelecidos pela RAS, (Brasil, 2009).

### **3.5.4. Tempo médio de germinação (TMG)**

Simultaneamente ao teste de germinação, calculado a partir dos valores diários, obtidos do número de plântulas germinadas com no mínimo um centímetro de parte radicular, do primeiro ao último dia de duração do teste de germinação. Calculado pela fórmula proposta por Edmond e Drapala (1958).

### **3.5.5. Massa seca**

Foi mensurada a massa em gramas (g) das plântulas obtidas ao final do teste de germinação por meio da secagem a 65°C por 72h até o peso constante, em estufa de circulação forçada de ar. Os cotilédones foram retirados com auxílio de bisturi. Logo após a secagem, os materiais ficaram em dessecador com sílica gel para resfriar e em seguida foi determinado o peso da massa seca das plântulas utilizando balança de precisão de 0,001g. A massa, foi dividida pelo número de plântulas por repetição, e o resultado expresso em mg plântula<sup>-1</sup> (Nakagawa, 2020).

### **3.5.6. Comprimento de plântulas**

Realizado com quatro repetições de 20 sementes distribuídas em duas fileiras para cada tratamento, em papel de germinação umedecido 2,5 vezes o seu peso seco e acondicionado em câmaras climáticas tipo B.O.D. a  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  e fotoperíodo de 12 horas (Brasil, 2009), pelo período de cinco dias. Após, determinou-se o comprimento médio da raiz primária e da parte aérea, com auxílio do programa ImageJ®. Os resultados foram apresentados em cm plântula<sup>-1</sup> (Nakagawa, 2020).

### **3.6. Ensaio 2 - Cultivo de microverdes para determinação dos parâmetros de produtividade, morfológicos e fitoquímicos**

O cultivo de microverdes foi adaptado de acordo com a metodologia descrita por Priti *et al.* (2022). Assim, um total de 200 sementes osmocondicionadas foram semeadas em quatro repetições por tratamento, com auxílio de semeadores, em bandejas plásticas (36,5×26,5×7cm) contendo areia que foi mantida a capacidade de campo (60%). Todo o desenvolvimento das plântulas ocorreu na câmara de germinação (B.O.D) sob temperatura de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ , fotoperíodo de 10/14h de claro/escuro, com apenas uma irrigação leve, até a colheita (aproximadamente na capacidade de campo 60%), que ocorreu no 9º dia. A coleta dos microverdes foi realizada com auxílio de uma tesoura esterilizada, cortando o caule aproximadamente 1,0 cm acima do substrato para na sequência realizar a determinação dos parâmetros de produtividade por meio da massa fresca, altura da parte aérea e rendimento.

#### **3.6.1. Massa fresca, altura da parte aérea e rendimento**

Foi mensurada a massa fresca das plântulas utilizando balança de precisão de 0,001g e a altura da parte aérea com auxílio do programa ImageJ®. A massa fresca foi expressa em gramas (g) da parte aérea da matéria fresca dividida pelo número de plântulas por repetição, o resultado foi expresso em mg plântula<sup>-1</sup> e os resultados da altura foram apresentados em cm plântula<sup>-1</sup>. Ao final foi calculado o rendimento da biomassa por meio do peso fresco por unidade de área em mg cm<sup>-2</sup> (Thuong; Minh, 2020).

#### **3.6.2. Selênio total**

Para determinação do selênio total (Silva *et al.*, 2020), 0,5 g de tecido vegetal seco e moído foi adicionado a uma mistura de 6,0 mL de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub> -  $\geq 65\%$ ) e ácido perclórico (HClO<sub>4</sub> - 69,72%), na proporção de 2:1 (v:v), permanecendo por 16 horas em repouso, a 25°C. Na sequência, o extrato passou pelo processo de digestão, em forno micro-ondas (MARSxpress, CEM, EUA), aquecido primeiramente por 10 minutos até atingir a temperatura de 175°C; na sequência aqueceu por mais 10 minutos a 175°C e foi resfriado, para ser finalmente diluído com 10,0 mL de água deionizada. Em seguida, as amostras foram armazenadas a 5°C para posterior quantificação por ICP-MS (NexION 2000, Perkin-Elmer, EUA). Para referência, utilizou-se uma solução contendo concentração certificada de selênio de  $6,70 \pm 0,25 \text{ mg kg}^{-1}$ , passando pelo mesmo procedimento acima mencionado, sendo o digerido obtido analisado por ICP-MS, com resultados expressos em mg kg<sup>-1</sup> de Se.

### 3.6.3. Clorofila a,b e total e carotenoides

Para a determinação dos teores de pigmentos de clorofila e carotenoides foi seguido a metodologia de Arnon (1949). Assim, 1,5 g do material vegetal foi incubado a uma solução de éter de petróleo e acetona (1:1), permanecendo por 24 horas na ausência de luz. Em seguida, o sobrenadante passou pela leitura de absorbância no espectrofotômetro (UV-5100), nos comprimentos de onda de 645 nm e 663 nm para clorofila A, clorofila B e clorofila total, respectivamente; e 470 nm para carotenoides. O teor de clorofila e carotenoides foram calculados de acordo com as equações abaixo (Shaukat *et al.*, 2021) e os resultados foram expressos em mg g<sup>-1</sup> de tecido fresco.

$$\text{Clorofila a (mg g}^{-1}\text{)} = 12,7 A_{663} - 2,64 A_{645}.$$

$$\text{Clorofila b (mg g}^{-1}\text{)} = 22,9 A_{645} - 4,68 A_{663}.$$

$$\text{Clorofila total (mg g}^{-1}\text{)} = \text{Chl a} + \text{Chl b}$$

$$\text{Teor carotenoides (mg g}^{-1}\text{)} = 1000 \times A_{470} - 1,9 \text{Chl a} - 63,14 \text{Chl b} / 214.$$

### 3.6.4. Determinação da capacidade antioxidante: Método do sequestro do radical DPPH

O extrato etanólico dos microverdes foi obtido por meio da maceração de 200g das plântulas, que previamente passaram por uma secagem em estufa a 50°C por 24 horas (Justino *et al.*, 2017). Após este processo, o macerado foi misturado em 1,0 L de etanol 98% na proporção de 1:5 m:v, em temperatura ambiente e ausência de luz, permanecendo durante sete dias.

Passado este período, a solução foi filtrada em filtro de papel e o solvente removido com auxílio de um evaporador rotativo (Bunchi Rotavapor R-210, Suíça) em banho-maria na temperatura de 40°C e sob pressão reduzida, até o último extrator ficar incolor. Por fim, o extrato foi congelado e liofilizado para a remoção da água, sendo acondicionado a -20°C.

O extrato também passou por uma partição líquido-líquido, onde 20g de extrato etanólico foram solubilizados em 200mL de solução hidrometanólica composta por 90% de metanol e 10% de água ultrapura, metanol: água (9:1 v:v). Em seguida foi realizada a filtração e partição, com os solventes: hexano (FH-Mi), diclorometano (FDM-Mi), acetato de etila (FAE-Mi) e n-butanol (FB-Mi), respectivamente em ordem crescente de polaridade em um funil de separação. Para esse processo, foram realizadas quatro extrações com aproximadamente 200mL de cada solvente. Os solventes foram removidos pelo evaporador rotativo sob pressão reduzida a 40°C e para remover a água remanescente, as frações foram congeladas e liofilizadas, permanecendo armazenadas a -20°C até serem utilizadas nas análises.

O teor de DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazila) foi mensurado conforme as

metodologias de Lopes-Lutz *et al.* (2008), seguidas de pequenas modificações, iniciando com a preparação da solução metanólica de DPPH ( $40 \mu\text{g mL}^{-1}$ ). A mistura foi transferida para tubos de ensaio, com 2,7 mL da solução de DPPH e adicionados de 0,3mL de cada diluição das amostras de Selenato e Selenito (0; 1; 5; 10 e 20%) permanecendo incubadas em temperatura de 30°C, na ausência de luz, por 30 min. Na sequência, foi preparado o controle que continha todos os reagentes, com exceção do extrato. Passados 60 minutos, foi realizada a leitura da absorbância a 515 nm em espectrofotômetro. O cálculo da porcentagem da atividade antioxidante foi determinado pela equação:

$$AA = (\%) = \left[ \frac{[(Acn - Amo)]}{Acn} \right] \times 100$$

Em que: AA = atividade antioxidante; "Amo" absorbância da mistura composto pelo DPPH e pela amostra e; "Acn" absorbância do DPPH com o metanol.

### 3.7. Análise Estatística

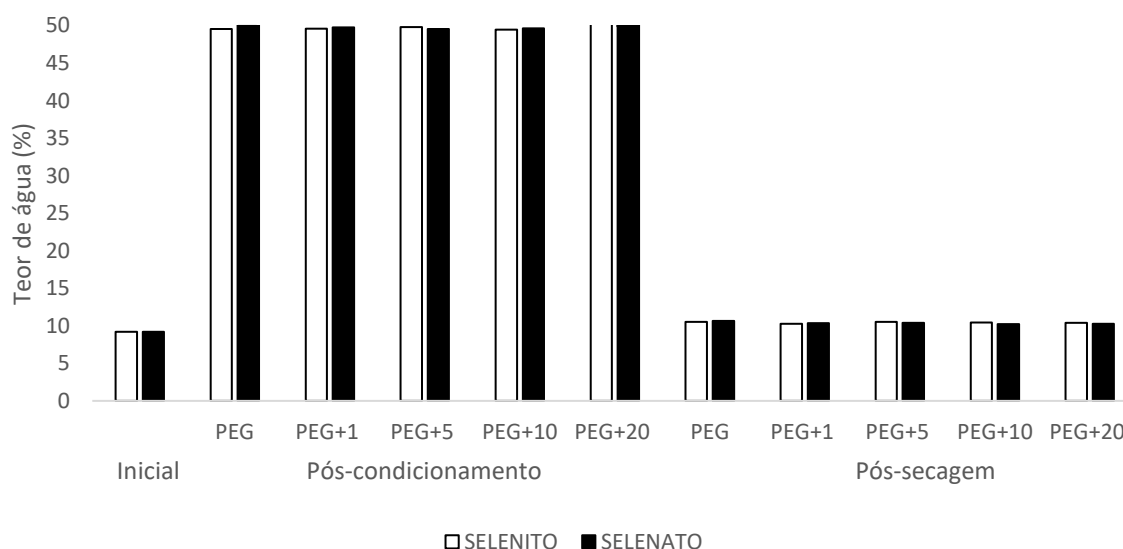
Os dados foram submetidos à análise de variância à significância de 5%, e as médias foram comparadas pelo teste de teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade. Para todas as análises, foi utilizado o software estatístico R 4.1.1. (R Core Team, 2020).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Ensaio 1

O teor de água inicial das sementes de lentilha foi de 9,2%. Sementes do *osmopriming* com selenito de sódio e selenato de sódio tiveram o teor de água, oscilando entre 49,5% e 50,2%, e entre 49,6% e 50,3%, respectivamente, ambas permanecendo na Fase II do processo de embebição. Após a secagem, os teores de água variaram de 10,2% a 10,5% para o tratamento com selenito de sódio e de 10,2% a 10,6% para o selenato de sódio (Figura 1). Observa-se, portanto uniformidade no teor de água das sementes, garantindo a padronização das avaliações. Segundo Marcos-Filho (2015), variações inferiores a 2% no teor de água são consideradas toleráveis, contribuindo para obtenção de resultados mais consistentes.

FIGURA 1. Teor de água (%) após o osmocondicionamento e após a secagem das sementes de lentilha (cv. BRS Mimi), nas diferentes soluções de selênio: selenato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ ) e selenito de sódio ( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ). Os tratamentos foram realizados com concentrações de 0, 1, 5, 10 e 20  $\text{mg L}^{-1}$  (PEG, PEG+1, PEG+5, PEG+10 e PEG+20) sob potencial osmótico de -0,8 MPa, durante 12 horas.



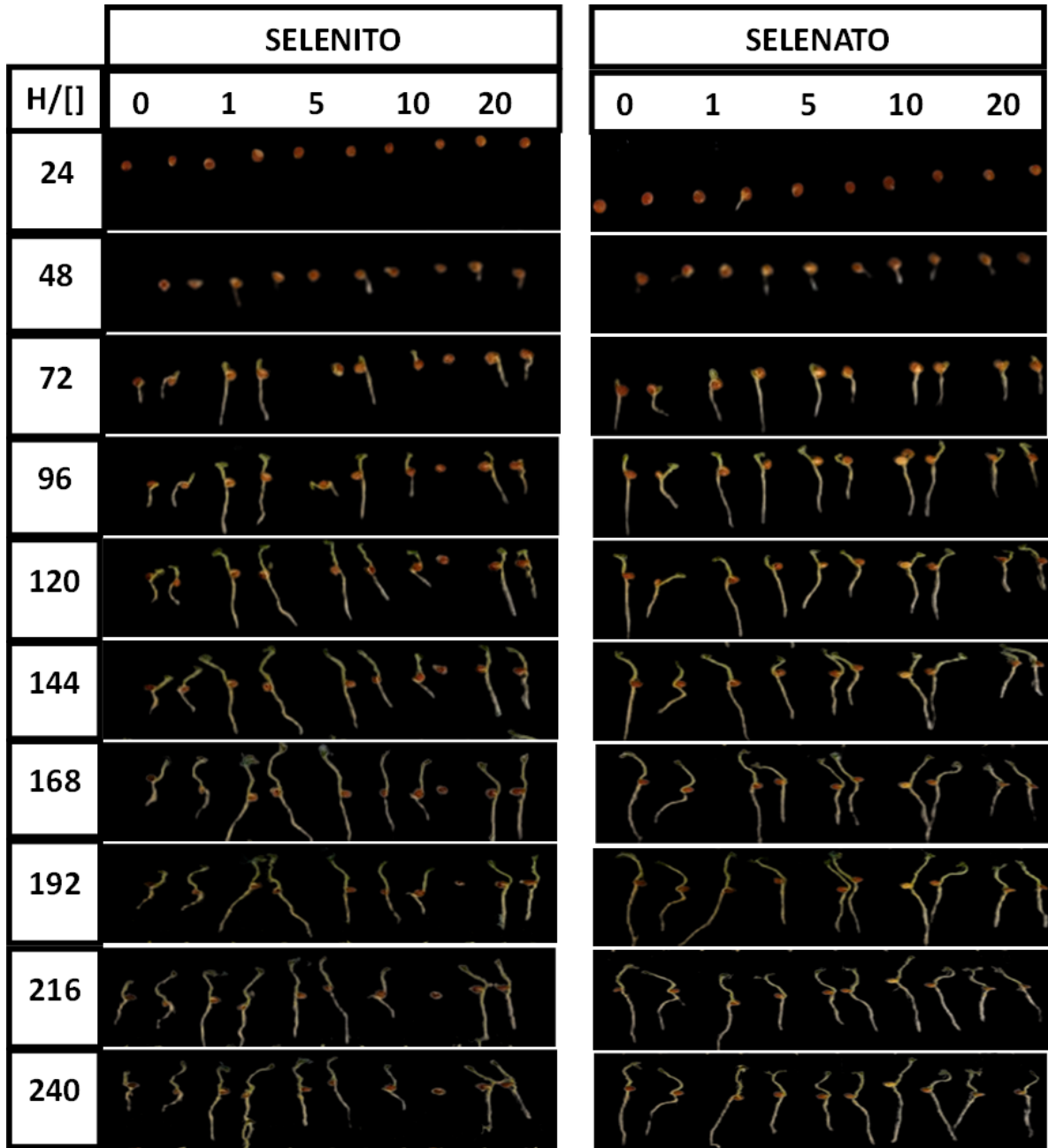
Fonte: o próprio autor

A biofortificação agrônômica representa uma estratégia importante para a produção de alimentos funcionais enriquecidos com minerais essenciais, como o selênio (Se), visando suprir deficiências nutricionais comuns. De acordo com Thavarajah *et al.* (2017), lentilhas biofortificadas com Se demonstram aptidão significativa para suprir as necessidades diárias recomendadas adequadas deste micronutriente na dieta humana. Resultados de pesquisas

anteriores sustentam essa técnica em diversas espécies vegetais (Sariñana-Navarrete *et al.*, 2024; Hussain *et al.*, 2023; Mansoor *et al.*, 2024; Silveira *et al.*, 2023). Entretanto ainda faltam informações sobre o impacto da tecnologia de condicionamento com selênio em sementes de lentilha. Estudos adicionais são necessários para avaliar como o condicionamento de sementes com selênio pode influenciar a germinação e o desenvolvimento inicial dessa espécie, possibilitando avanços na biofortificação e na promoção da qualidade das plântulas. Como relatado, o condicionamento de sementes foi aplicado para potencializar o vigor e promover o crescimento inicial, especialmente com uso de selênio (Sariñana-Navarrete *et al.*, 2024; Mansoor *et al.*, 2024; Raj; Raj, 2019).

O *priming* inicia o estágio germinativo e ativa importantes processo metabólicos (Yanchenko; Bukharov; Fedosov, 2023), como os mecanismos de reparo de membranas, mitocôndrias e DNA, a síntese de DNA, RNA e mitocôndrias, o desenvolvimento de embriões imaturos, além de promover a superação da dormência (Raj; Raj, 2019; Romeu *et al.*, 2021). Ma *et al.*, (2024) indicaram que o osmocondicionamento melhorou o desempenho, o vigor e a uniformidade de germinação das sementes de *Coronilla varia* L. Essa técnica facilita a absorção controlada de água, limitando as lesões oxidativas causadas por espécies reativas de oxigênio (ROS), uma vez que favorece a ativação do sistema enzimático que protege contra o estresse oxidativo e consequentemente, contribui para o desenvolvimento inicial das plântulas (Paparella *et al.*, 2015). Essa melhoria na uniformidade de germinação, ganho de desempenho em velocidade de germinação, tempo médio de germinação, vigor das mudas, com maiores rendimentos econômicos e a maior resistência estresses bióticos e abióticos (Raj; Raj, 2019), pode ser visualizado na Figura 2.

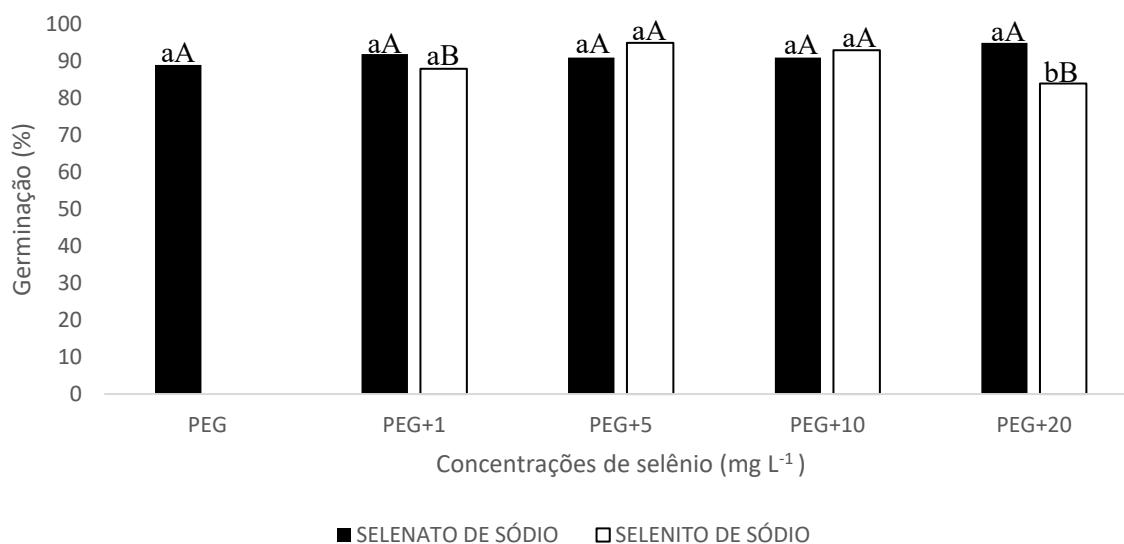
FIGURA 2. Evolução da germinação em sementes de lentilha, cv. BRS Mimi, osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ ) e selenito de sódio ( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ), nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20  $\text{mg L}^{-1}$  (PEG, PEG+1, PEG+5, PEG+10 e PEG+20), a -0,8 MPa por 12h, pelo período de 24h a 240h. Onde: \*Análise feita em duplas para cada combinação dos fatores (concentração x fonte ao longo do tempo).



Fonte: o próprio autor

A germinação é caracterizada por potencializar os valores nutricionais e bioativos das sementes, especialmente amplificando seus efeitos antioxidantes (Gan *et al.*, 2017), um processo seletivo e eficaz para o enriquecimento de compostos bioativos (Liu *et al.*, 2022) promovendo melhorias significativas. Como pode ser observado, o osmocondicionamento e o osmocondicionameto com Se favoreceram a germinação da cv. BRS Mimi (Figura 3).

FIGURA 3. Germinação (%) de sementes de lentilha, cv. BRS Mimi, osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG, PEG+1, PEG+5, PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h.



F=0.00637\*; CV=4,35%. F = valor de F calculado e CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas entre fontes e maiúsculas entre concentrações, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Fonte: o próprio autor

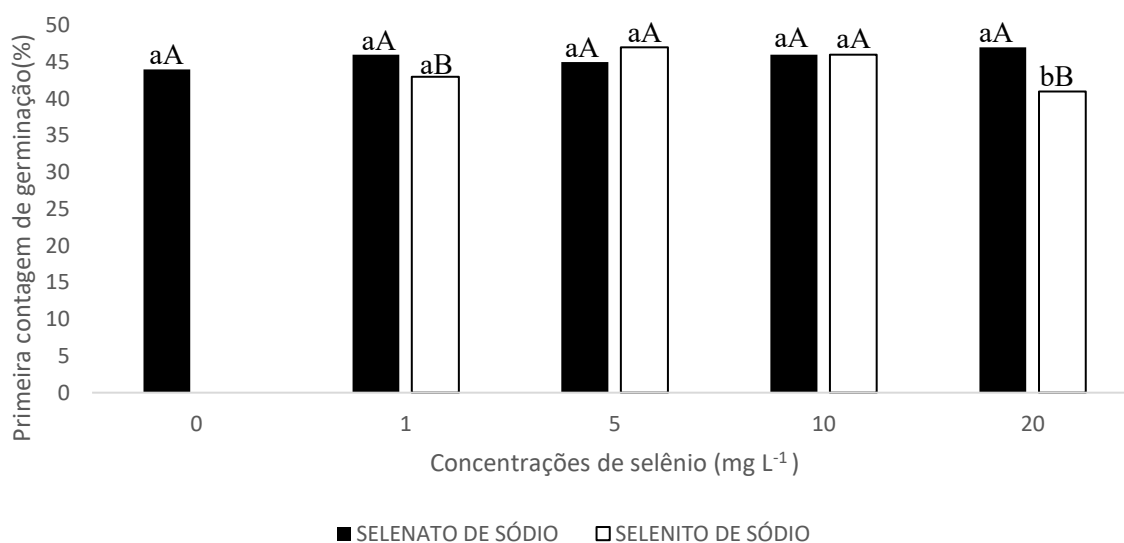
As fontes de selênio influenciaram significativamente a germinação nas doses testadas. No teste de germinação, as sementes demonstram seu máximo potencial fisiológico para desenvolverem-se em plântulas normais, fornecendo assim informações de desempenho em condições ideais (Krzyzanowski *et al.*, 2017). O teste de germinação gerou uma diferença apenas para as sementes que passaram por condicionamento com selenito, resultando em uma germinação inferior aos outros tratamentos com selenato e ao osmocondicionamento (Figura 3).

No tratamento controle, sem adição de selenato e selenito, a germinação foi de 89%. O osmocondicionamento utilizando polietilenoglicol com adição de selenato de sódio na concentração de 12,5 µM favoreceu maiores percentuais de germinação de sementes de tomate, conforme observado por Silveira *et al.* (2023). Em todas as concentrações de selenato de sódio não houve diferenças quanto a porcentagem de germinação das sementes. Já para o selenito de sódio, os melhores resultados do processo germinativo foram verificados nas doses de PEG+5 e PEG+10 mg L<sup>-1</sup>.

A dose de PEG+1 mg L<sup>-1</sup> não foi suficiente para aumentar a germinação, enquanto na dose de PEG+20 mg L<sup>-1</sup>, pode ter ocorrido a toxicidade do selenito, com redução de 11 pontos

percentuais. Possivelmente, o selenito pode comprometer significativamente o processo germinativo em concentrações mais elevadas; no entanto, em doses intermediárias pode ser benéfico para as sementes de lentilha. Em estudo realizado com sementes de pimenta jalapeño, o selenito atuou como um bioestimulante nas doses de 1 mg L<sup>-1</sup> a 10 mg L<sup>-1</sup> favorecendo a germinação; contudo, na concentração de 15 mg L<sup>-1</sup>, houve redução da germinação (Sariñana-Navarrete *et al.*, 2024). De forma semelhante, nas doses de 2 a 5 mg L<sup>-1</sup> de selenito resultaram em maiores porcentagens de germinação em sementes de milho (Al-Omairi; AL-Hilfy, 2021). Zhang *et al.* (2012) relataram que concentrações de selenito entre 25 e 50 mg L<sup>-1</sup> foram consideradas apropriadas para aumento da germinação de sementes de grão-de-bico.

FIGURA 4. Primeira contagem de germinação (%) de sementes de lentilha, cv. BRS Mimi, osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h.



F=0.00299\*; CV=4,35%. F = valor de F calculado e CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas entre fontes e maiúsculas entre concentrações, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

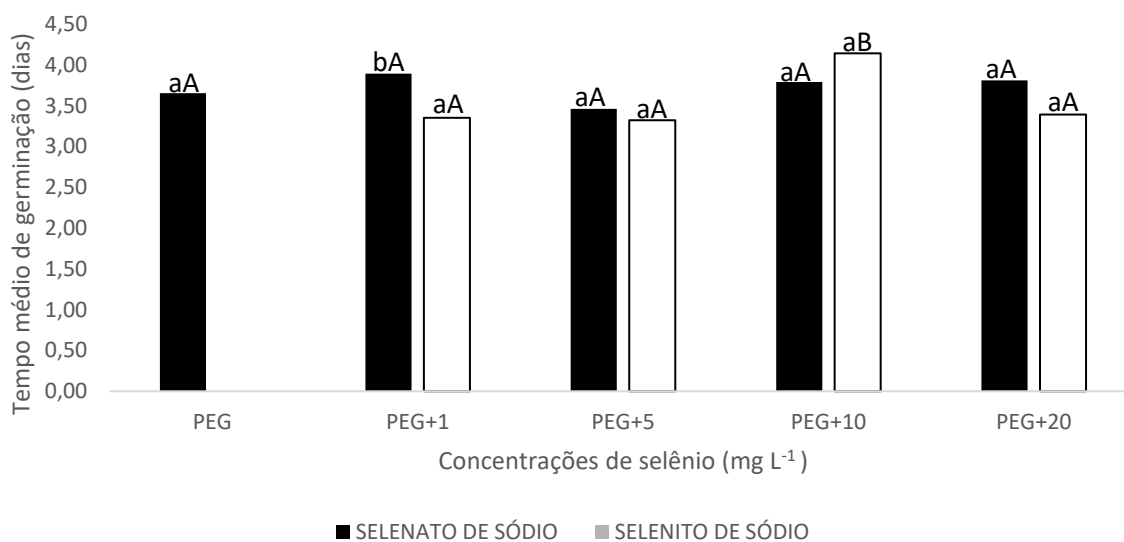
Fonte: o próprio autor

O selênio influencia de forma positiva na integridade da membrana plasmática, permitindo que as sementes iniciem a germinação de maneira mais rápida e eficiente (Rocha *et al.*, 2022). Na figura 4, a análise da primeira contagem de germinação, sem a adição de selênio e com selenato revelaram taxas semelhantes de germinação e, mais uma vez, a adição de selenito resultou em uma germinação inferior.

O selenito de sódio nas dosagens de PEG+1 e PEG+20 mg L<sup>-1</sup>, provocou uma menor germinação na primeira leitura, com porcentagens de 43% e 41%, respectivamente. Por meio desses resultados, pode-se inferir que o selenito pode promover um impacto negativo sobre a germinação em baixa ou em alta concentrações. Al-Omairi; Al-Hilfy (2021), relataram que sementes de milho da cultivar Baghdad 3 condicionadas com selenito na dosagem de 2 mg L<sup>-1</sup> apresentaram a maior média de germinação na primeira contagem. Já, Silveira *et al.* (2023) observaram aumentos significativos na PCG em sementes de tomate quando osmocondicionadas com selenato de sódio, na concentração de 12,5 µM. Esses resultados sugerem que o *priming* com Se pode melhorar o vigor inicial, promovendo uma germinação mais uniforme e eficiente.

A aplicação de selenato e selenito de sódio resultaram em tempos médios de germinação (TMG) distintos para as sementes de lentilha, conforme as concentrações utilizadas (Figura 5).

FIGURA 5. Tempo médio de germinação (dias) de sementes de lentilha, cv. BRS Mimi, osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h.



F=0.04566\*; CV=8,20%. F = valor de F calculado e CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas entre fontes e maiúsculas entre concentrações, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Fonte: o próprio autor

Na comparação entre as fontes é possível observar que houve diferença com aplicação de selenato e na concentração PEG+10 mg L<sup>-1</sup> (Figura 5). O TMG é um parâmetro

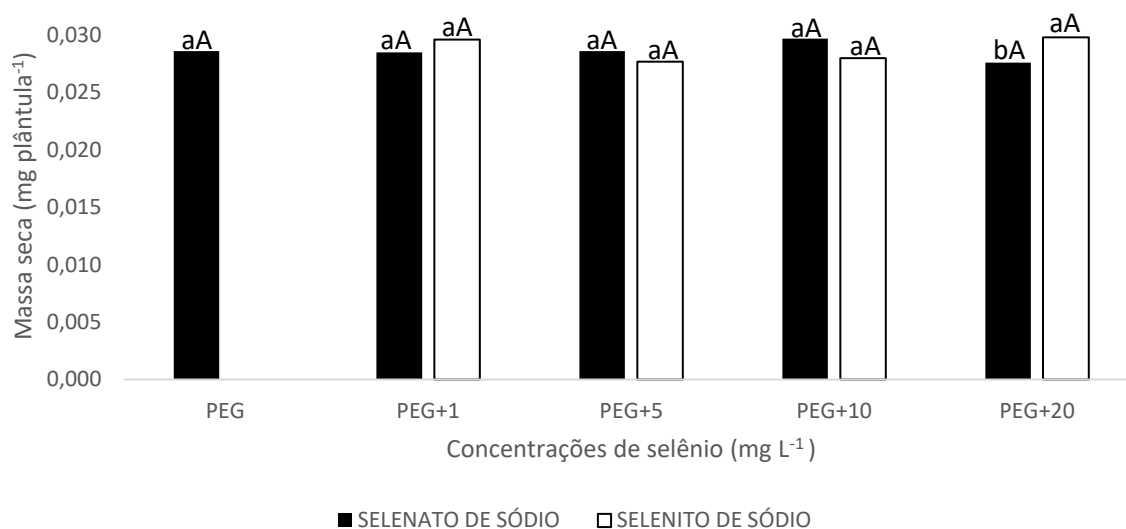
complementar às taxas de germinação, oferecendo informações sobre o vigor das sementes e representando o tempo médio necessário para a germinação ocorrer, quanto menor melhor (Borghetti; Ferreira, 2004).

No tratamento controle, o tempo médio de germinação (TMG) foi de 3,65 dias, resultados semelhantes foram observados em todas as concentrações testadas com selenato de sódio. Já na concentração de PEG+10 mg L<sup>-1</sup>, o selenito de sódio apresentou o TMG mais elevado entre os tratamentos, com valor de 4,14 dias para a germinação.

Portanto, a aplicação de selenito de sódio via condicionamento fisiológico de sementes, na dose PEG+10 mg L<sup>-1</sup> pode acelerar o tempo médio de germinação, como demonstrado em estudos com sementes de pimenta jalapeño, contribuindo para a redução do tempo (Sariñana-Navarrete *et al.*, 2024). No entanto, Al-Omairi; Al-Hilfy (2021), relataram que a imersão das sementes de milho em solução de selenito a 2 mg L<sup>-1</sup> reduziu o tempo da germinação, porém em doses superiores afetou negativamente o TMG. O efeito do osmocondicionamento associado ao Se otimiza o desenvolvimento inicial ao promover processos metabólicos essenciais (Silveira *et al.*, 2023), como também protege a integridade das membranas celulares limitando o dano oxidativo (Paparella *et al.*, 2015). Ainda segundo Al-Omairi; Al-Hilfy, (2021); Nie *et al.* (2023), a hidratação controlada preserva a integridade das membranas celulares e, promove a reorganização e restauração das estruturas originais, o que resulta em melhores desempenhos das sementes submetidas ao *priming*.

Em relação à massa seca, o selenato de sódio promoveu a redução na biomassa das plântulas de lentilha, abaixo de 0,028 mg plântula<sup>-1</sup>, não sendo observadas diferenças entre os tratamentos com selenito de sódio e com o osmocondicionamento (Figura 6).

FIGURA 6. Médias de massa seca (mg plântula<sup>-1</sup>) de plântulas de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG, PEG+1, PEG+5, PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h.



F=0.03399\*; CV=4,35%. F = valor de F calculado e CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas entre fontes e maiúsculas entre concentrações, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

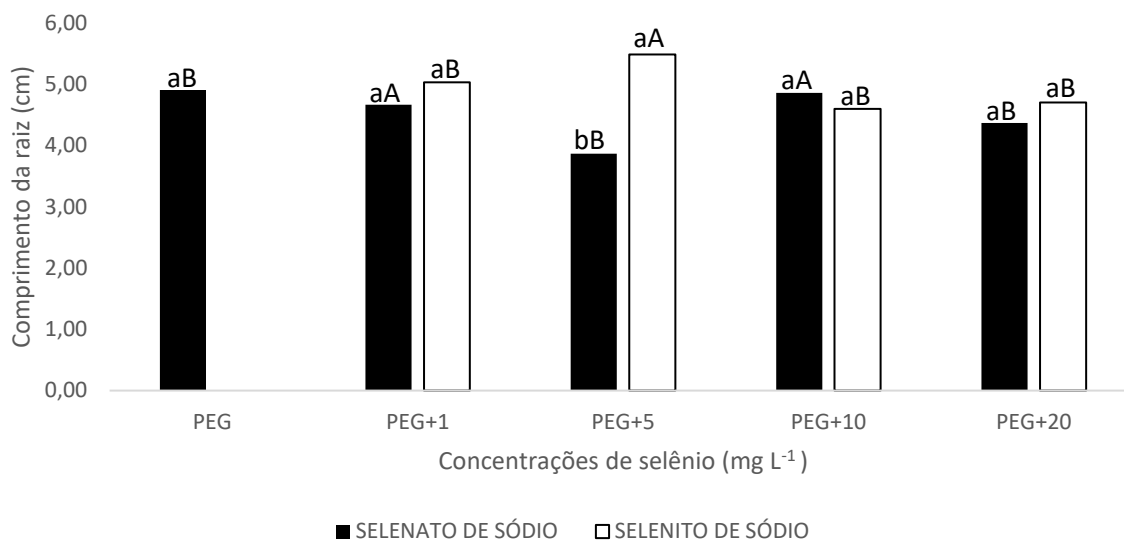
Fonte: o próprio autor

A avaliação da massa seca das plântulas normais permite mensurar o vigor relativo, evidenciando a transferência eficiente da matéria seca do tecido de reserva das sementes para o eixo embrionário (Krzyzanowski *et al.*, 2017). Quanto a análise da massa seca, a maioria dos tratamentos se destacaram quando submetidos ao osmocondicionamento com PEG e PEG + Se, o que contribuiu para a obtenção de maiores valores. O osmocondicionamento com PEG produziu um valor de massa seca 0,029 mg plântula<sup>-1</sup>. Resultados aproximados foram observados para os demais tratamentos, tanto com selenato quanto com selenito, em todas as concentrações testadas, sugerindo uma estabilidade consistente nas diferentes concentrações avaliadas.

A adição de selenito de sódio em sementes de milho na concentração de 2 mg L<sup>-1</sup> resultou em maior peso médio de plântulas (Al-Omairi; Al-Hilfy, 2021). Bayat; Aminifard (2021) também utilizando 2 mg L<sup>-1</sup> de selenato de sódio observaram um maior acúmulo de matéria seca em plantas de calêndula. Em concordância com esses resultados, o condicionamento de sementes de arroz 0,8 mg L<sup>-1</sup> de selenito aumentou o acúmulo de biomassa seca das plântulas (Moulick; Ghosh; Chandra Santra, 2016).

Ao analisar o efeito das diferentes fontes de selênio sobre o comprimento da raiz primária das plântulas de lentilha, observou-se que houve maior efeito do selenito de sódio (Figura 7).

FIGURA 7. Comprimento da raiz (cm) de plântulas de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG, PEG+1, PEG+5, PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h.



F=0.00013\*; CV=40,43%. F = valor de F calculado e CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas entre fontes e maiúsculas entre doses, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Fonte: o próprio autor

Para o comprimento radicular (Figura 7), foi observada uma diferença entre as fontes, com o selenato de sódio provocando um menor crescimento da radícula, diferente do selenito de sódio e do osmocondicionamento. No estudo de Rocha *et al.* (2022), o tratamento com selenato em altas concentrações apresentou um efeito positivo no comprimento radicular. O sistema radicular desempenha um papel fundamental no processo de absorção de água e nutrientes, essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Calleja-Cabrera *et al.*, 2020). Dessa forma, o desenvolvimento e o rendimento das culturas estão diretamente associados ao crescimento e à parâmetros radiculares, como o comprimento das raízes (Cheng *et al.*, 2023).

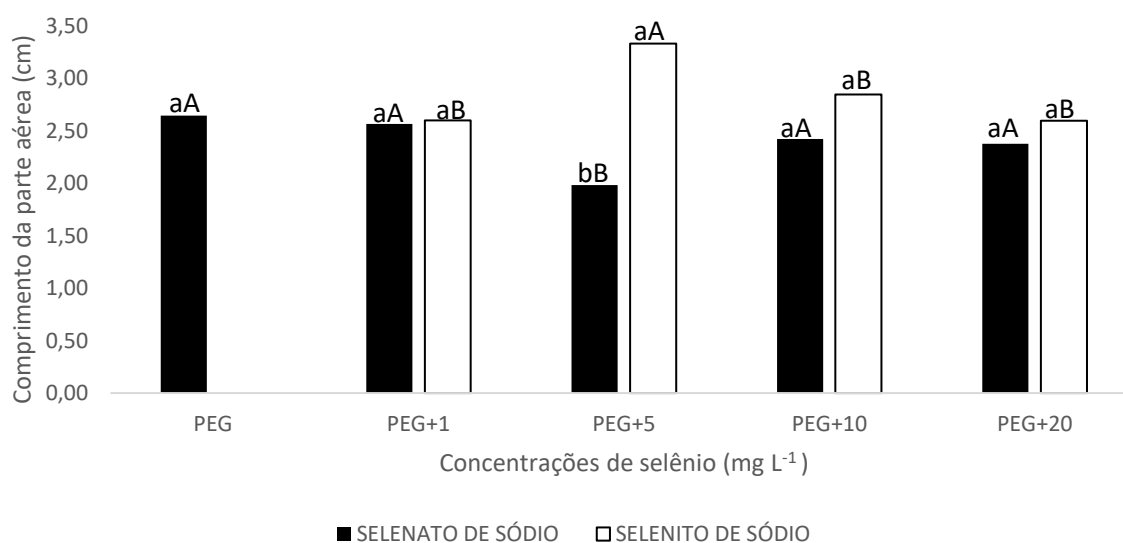
No tratamento sem a adição de selênio, o comprimento médio das raízes foi de 4,91cm, resultados similares foram encontrados nas concentrações de PEG+1 mg L<sup>-1</sup> e PEG+10 mg L<sup>-1</sup> com selenato de sódio, ambas promoveram o desenvolvimento radicular. Nas concentrações de PEG+5 mg L<sup>-1</sup> e PEG+20 mg L<sup>-1</sup> com selenato de sódio houve redução no comprimento radicular das plântulas, indicando um efeito possivelmente tóxico.

O selenito, por sua vez, foi prejudicial na maioria das concentrações avaliadas,

resultando nos menores comprimentos das raízes, exceto na concentração de PEG+5 mg L<sup>-1</sup>, que promoveu um aumento de 5,49 cm, mostrando mais eficaz para o crescimento radicular das plântulas de lentilha. A imersão de sementes de milho da cultivar Baghdad 3 em solução de 2 mg L<sup>-1</sup> de selenito promoveu a maior média de comprimento radicular; no entanto, o aumento das concentrações teve um efeito adverso (Al-Omairi; Al-Hilfy, 2021). Em sementes de *Capsicum annuum* L., o *priming* com selenito de sódio inibiu o crescimento radicular a partir da concentração de 1 mg L<sup>-1</sup> (Sariñana-Navarrete et al., 2024).

No comprimento da parte aérea, as fontes de selênio apresentaram diferenças significativas, particularmente nas doses intermediárias, em que o selenito e o selenato de sódio tiveram efeitos antagônicos, interferindo no desenvolvimento do comprimento da parte aérea. (Figura 8).

FIGURA 8. Comprimento da parte aérea (cm) de plântulas de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG, PEG+1, PEG+5, PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h.



F=0.00000\*; CV=42,39%. F = valor de F calculado e CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas entre fontes e maiúsculas entre doses, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Fonte: o próprio autor

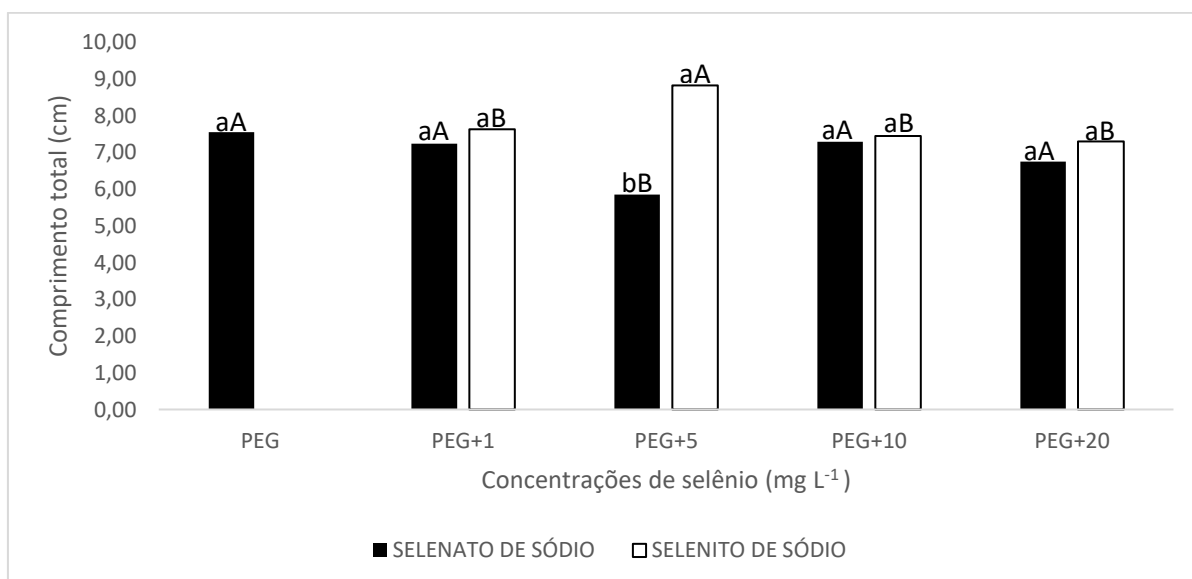
A análise do comprimento da parte aérea (Figura 8), demonstrou que o selenito de sódio apresentou maior eficiência em estimular o crescimento da parte aérea em comparação ao selenato de sódio, promovendo maior comprimento.

Ao se analisar o desdobramento das concentrações, observa-se que, na ausência de selênio (PEG), o comprimento da parte aérea alcançou 2,64 cm, indicando que o crescimento da parte aérea das plântulas não foi negativamente afetado pela ausência de Se.

O selenito, em especial na concentração PEG+5 mg L<sup>-1</sup>, estimulou o crescimento da parte aérea, na qual foi observado o maior valor médio de crescimento (3,26 cm), enquanto nas demais concentrações houve menor desenvolvimento da parte aérea. Esse destaque do selenito na concentração de PEG+5 mg L<sup>-1</sup> pode estar relacionado à sua maior biodisponibilidade ou à forma como é assimilado e metabolizado pelas sementes durante o processo de condicionamento, favorecendo processos como a ativação enzimática e o equilíbrio redox, que são cruciais nas fases iniciais do desenvolvimento vegetal.

Em contrapartida, o selenato de sódio não provocou decréscimos no comprimento da parte aérea na maioria das concentrações testadas, com exceção da concentração de PEG+5 mg L<sup>-1</sup>, que promoveu uma redução significativa no comprimento da parte aérea (1,94 cm), sugerindo um possível efeito tóxico ou de estresse oxidativo nessa concentração com selenato. Nas concentrações mais elevadas (PEG+10 e PEG+20 mg L<sup>-1</sup>), o selenito manteve médias superiores às do selenato, ainda que sem diferenças estatísticas expressivas em relação ao controle (PEG), indicando uma possível tolerância a doses mais altas dessa fonte. Moulick; Ghosh; Chandra Santra (2016), observaram que o selenito em dosagens baixas produziram maiores comprimentos de parte aérea, reafirmando a influência positiva do microelemento.

FIGURA 9. Comprimento total (cm) de plântulas de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG, PEG+1, PEG+5, PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h.



$F=0.00001^*$ ;  $CV=38,33\%$ .  $F$  = valor de  $F$  calculado e  $CV$  = coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas entre fontes e maiúsculas entre doses, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Fonte: o próprio autor

Para o comprimento total (Figura 9), as fontes de selênio apresentaram resultados semelhantes aos observados para o comprimento da parte aérea e do sistema radicular. O selenato de sódio comprometeu de forma negativa o comprimento total das plântulas de lentilha em comparação ao selenato. Houve uma diferença significativa entre as fontes, novamente o antagonismo entre selenato e o selenito de sódio, principalmente na concentração de  $PEG+5 \text{ mg L}^{-1}$ . Essa medida de vigor é determinada pela soma dos comprimentos médios das plântulas normais, considerando os componentes raiz e parte aérea, onde plântulas com maior comprimento total são indicativas de maior vigor (Krzyzanowski et al., 2017).

No controle (PEG), as plântulas de lentilha apresentaram comprimento de 7,55 cm, sem diferença estatística, mais uma vez sugerindo que a ausência do Se não compromete o desenvolvimento inicial dessas plântulas.

Na concentração de  $PEG+5 \text{ mg L}^{-1}$ , com selenito, o incremento total do comprimento se sobressaiu em 8,82cm, contudo nas demais concentrações testadas reduziu significativamente o comprimento total.

Por outro lado, o selenato de sódio, na concentração de  $5 \text{ mg L}^{-1}$  (PEG+5), promoveu uma redução significativa no comprimento total das plântulas (5,89 cm), o que indica um possível efeito fitotóxico ou inibição do crescimento nessa dosagem. Entretanto, na concentração de  $1 \text{ mg L}^{-1}$  (PEG+1), observou-se um discreto incremento no desenvolvimento, enquanto nas concentrações mais elevadas (PEG+10 e  $PEG+20 \text{ mg L}^{-1}$ ), os valores mantiveram-se próximos aos do controle, sugerindo que o selenato pode apresentar maior tolerância em concentrações crescentes.

Fica claro que o osmocondicionamento com PEG influenciou o desempenho fisiológico das sementes de lentilha e que o osmocondicionamento com selênio, em baixas concentrações, pode promover o vigor inicial ao atuar como bioestimulante. No entanto, em concentrações excessivas, o selênio pode apresentar efeitos tóxicos, o que explica a redução nas taxas de germinação e primeira contagem de germinação, o aumento do tempo médio de germinação e as variações nos comprimentos da raiz, parte aérea e comprimento total.

#### 4.2. Ensaio 2

Neste estudo, investigou-se a viabilidade de enriquecer microverdes de lentilha com selênio por meio do osmocondicionamento de sementes, utilizando como fontes o selenito de sódio e o selenato de sódio, aplicados em concentrações previamente estabelecidas. O Se é um nutriente associado a toxidez, porém necessário à saúde humana, daí a necessidade de encontrar uma fonte e concentração exata. Segundo Viltres-Portales *et al.* (2024), o selenato é transportado com maior eficiência para os brotos, onde pode se acumular, enquanto o metabolismo do selenito em espécies orgânicas biodisponíveis ocorre de forma mais rápida e requer menor consumo energético pelas plântulas. Porém, estudos anteriores mostraram que a combinação de espécies de selênio modulam o acúmulo e reduzem os efeitos de forma individual (Viltres-Portales *et al.*, 2024).

Ao comparar as fontes de selênio em relação à massa fresca (Tabela 4), observou-se que o selenito apresentou maior estabilidade em mg plântula<sup>-1</sup> nos microverdes de lentilha ao longo do experimento, diferentemente do selenato, que causou uma redução nas concentrações de PEG+5 e PEG+20 mg L<sup>-1</sup>, refletindo em menores pesos das plântulas. Resultados semelhantes com 25 µmol/L de selenito de sódio foram obtidos por Nie *et al.* (2023), com plântulas sorgo. Entretanto, os resultados obtidos diferem daqueles relatados para microverdes de couve, couve-rábano e trigo submetidos à biofortificação com uma mistura de selenito e selenato de sódio na concentração de 20 µmol.L<sup>-1</sup>, nos quais o rendimento de biomassa não apresentou alterações significativas.

Tabela 2 - Massa fresca (mg plântula<sup>-1</sup>), altura (cm plântula<sup>-1</sup>) e rendimento (mg m<sup>-2</sup>) de microverdes de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h.

Fontes	Massa fresca (mg plântula <sup>-1</sup> )				
	Doses				
	PEG	PEG+1	PEG+5	PEG+10	PEG+20
<b>Selenito</b>	0.1032 aB	0.1156 aA	0.1211 aA	0.1134 aA	0.1157 aA
<b>Selenato</b>	0.1032 aB	0.1103 aB	0.1038 bC	0.1174 aA	0.1087 bB

F=5.5271e<sup>-05</sup>\*; CV=5,35 %

Fontes	Altura (cm plântula <sup>-1</sup> )				
	Doses				
	PEG	PEG+1	PEG+5	PEG+10	PEG+20

	PEG	PEG+1	PEG+5	PEG+10	PEG+20	
<b>Selenito</b>	7,395	8,851	8,652	9,098	9,172	8,63 a
<b>Selenato</b>	7,246	8,527	8,862	8,446	8,232	8,26 b
	7,32 B	8,69 A	8,76 A	8,77 A	8,70 A	
F= 0.161421 <sup>NS</sup> ; CV=41,11%						
Rendimento (mg m <sup>-2</sup> )						
Fontes	Doses					
	PEG	PEG+1	PEG+5	PEG+10	PEG+20	
<b>Selenito</b>	0,019	0,021	0,022	0,022	0,020	0,208 a
<b>Selenato</b>	0,019	0,020	0,020	0,022	0,021	0,201 b
	0,0190 C	0,0205 B	0,0210 B	0,0216 A	0,0207 B	

F=0.187470<sup>NS</sup>; CV=6,02%. F = valor de F calculado e CV = coeficiente de variação. ; <sup>NS</sup> = não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade e \* = significativo pelo teste F a 5% de probabilidade. Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas entre fontes e maiúsculas entre doses, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Fonte: O próprio autor

No controle, que recebeu apenas osmocondicionamento, houve uma leve diminuição na massa das plântulas. Isso indica que a produção de massa fresca foi afetada pela adição de Se. Em contraste, o selenito, em todas as dosagens testadas, apresentou resultados superiores ao controle. Em relação ao selenato, a concentração de PEG+10 mg L<sup>-1</sup> se destacou das demais com uma produção de massa fresca de 0,1174, sendo superior ao controle em 13,8%. As concentrações de PEG+5 e PEG+20 mg L<sup>-1</sup> produziram resultados bem inferiores, demonstrando o possível efeito tóxico do selenato e do PEG sob a massa fresca. Por outro lado, o selenato de sódio demonstrou maior eficiência no cultivo de microverdes de endro, na concentração de 3 mg L<sup>-1</sup> (Sheikhi *et al.*, 2024).

Em relação à altura, não se observou interação significativa entre os fatores, conforme mostrado na Tabela 4. O selenito foi superior ao selenato de sódio, promovendo maior incremento na altura das plântulas. No estudo de Nie *et al.* (2023), com condicionamento de sementes de sorgo, na concentração de 25 µmol/L de selenito de sódio estimulou um aumento em 36,3% na altura das plântulas. Em pesquisa conduzida com microverdes de endro (*Anethum graveolens* L.), o selenato de sódio nas concentrações de 1,5 e 3 mg L<sup>-1</sup> proporcionou desempenho superior em relação à altura das plântulas (Sheikhi *et al.*, 2024). De forma oposta, Islam *et al.* (2020), observaram que a biofortificação com selenito não foi capaz de promover aumento na altura das plântulas de trigo cultivadas em sistema hidropônico.

Com exceção do tratamento controle, que não houve incremento na altura dos

microverdes, as demais concentrações com Se apresentaram resultados semelhantes entre si. Esses dados indicam que o crescimento dos microverdes é influenciado pela concentração de selênio aplicada (Islam *et al.*, 2020).

No que diz respeito ao rendimento, também não se observou interação significativa entre os fatores, porém, o selenito de sódio proporcionou o melhor crescimento e desenvolvimento por unidade de área, quando comparado ao selenato. Islam *et al.* (2020), verificaram que a biofortificação com selenito apresentou efeito negativo sobre o rendimento dos microverdes de trigo. O tratamento com apenas PEG promoveu rendimento 12,5% inferior ao tratamento com PEG+10 mg L<sup>-1</sup> (0,0216 mg m<sup>2</sup>), embora essa influência tenha sido menos pronunciada nas dosagens de PEG+1, PEG+5 e PEG+20 mg L<sup>-1</sup>, no qual resultaram reduções de 5,4%, 2,8% e 4,3%, respectivamente. Destaque para a dose de PEG+10 mg·L<sup>-1</sup>, que apresentou o maior rendimento médio (0,0216 mg·m<sup>-2</sup>), diferindo estatisticamente das demais. De acordo com Ekanayake *et al.* (2015), a quantidade adequada de selênio pode estimular o crescimento das plantas e aumentar o rendimento da lentilha. No entanto, foi relatado que o uso de selenato de sódio não promoveu efeito significativo sobre o rendimento de microverdes de manjerição verde e roxo (Pannico *et al.*, 2020) e de endro (Sheikhi *et al.*, 2024), em contrapartida, Pannico *et al.* (2020), verificaram efeitos significativos sobre a produção de biomassa fresca por área de de tatsoi e coentro, com a utilização de 16 µM de selenato de sódio.

Esses resultados são relevantes para otimizar o uso de selênio nas culturas de microverdes, em relação à massa fresca, a altura e ao rendimento, nos quais o selenito se mostrou mais promissor.

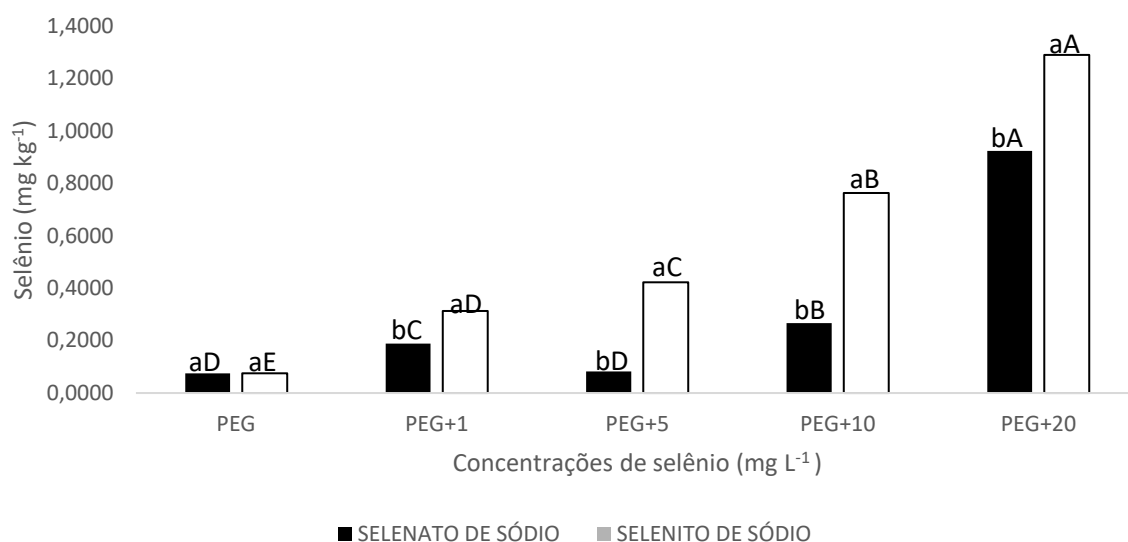
As fontes de selênio demonstraram influência significativa sobre os microverdes de lentilha, apresentando comportamento distintos em relação ao acúmulo de Se. A capacidade específica das plantas de absorverem e acumularem Se em seus tecidos está diretamente relacionada a espécie de Se utilizada na biofortificação (selenito ou selenato), à duração da exposição ao tratamento e à disponibilidade de nutrientes no meio de cultivo (D'amato *et al.*, 2018; Newman *et al.*, 2021).

Observa-se na Figura 10, um incremento progressivo no acúmulo de selênio nos microverdes à medida que aumentam as concentrações das soluções utilizadas no osmocondicionamento, tanto para o selenato quanto para o selenito. Este padrão sugere uma relação dose-resposta positiva, indicando que o aumento da disponibilidade de selênio no ambiente promove maior absorção pelas plântulas.

Em todas as concentrações testadas (exceto na ausência de selênio, PEG), os microverdes tratados com selenito de sódio apresentaram acúmulo significativamente superior

de selênio em comparação ao selenato de sódio. (Figura 10). Isso indica que o selenito pode ser absorvido e translocado com mais eficiência durante o crescimento dos microverdes (Garg *et al.*, 2018). As sementes são capazes de absorver o Se por meio do processo de difusão passiva, transferindo-o posteriormente para as partes comestíveis das plântulas (Islam *et al.*, 2020). De acordo com Viltres-Portales *et al.* (2024) a biofortificação com  $20 \mu\text{mol L}^{-1}$  Se promoveu a bioacumulação desse elemento em microverdes de couve, couve-rábano e trigo.

FIGURA 10. Médias da quantidade de selênio ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) de microverdes de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e  $20 \text{ mg L}^{-1}$  (PEG, PEG+1, PEG+5, PEG+10 e PEG+20) a  $-0,8 \text{ MPa}$  por 12h.



$F=0.00001^*$ ;  $CV=38,33\%$ .  $F$  = valor de  $F$  calculado e  $CV$  = coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas entre fontes e maiúsculas entre doses, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

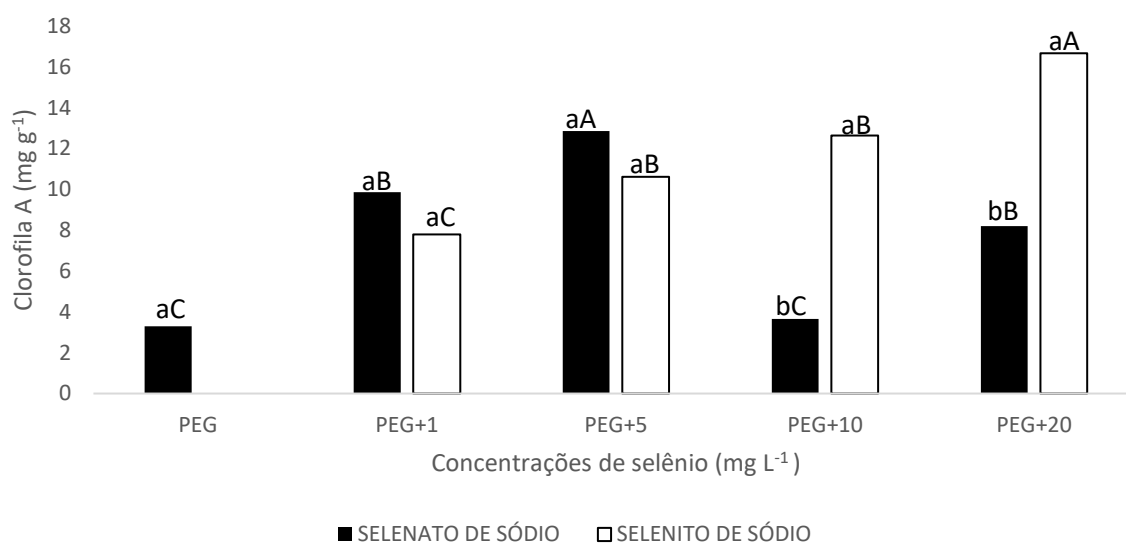
Fonte: o próprio autor

Na ausência de aplicação do micronutriente (PEG), foram detectados níveis residuais mínimos de selênio nos microverdes, conforme esperado (Figura 10). Quanto às concentrações testadas, observou-se que o selenito de sódio promoveu acúmulo superior de selênio em comparação ao selenato de sódio em todas as doses avaliadas, com destaque para a concentração de  $20 \text{ mg L}^{-1}$  (PEG+20), na qual foram obtidos  $1,288 \text{ mg kg}^{-1}$  com selenito e  $0,9228 \text{ mg kg}^{-1}$  com selenato. Em relação ao controle, esses valores representam aumentos expressivos de cerca de 1227% para o selenato e 1713% para o selenito. Ademais, o selenito demonstrou elevada eficiência de absorção mesmo em doses reduzidas, como nas concentrações de 1 e  $5 \text{ mg L}^{-1}$

(PEG+1 e PEG+5), além da dose intermediária de 10 mg L<sup>-1</sup> (PEG+10), que resultou em acúmulo mais que duas vezes superior ao verificado com o selenato de sódio na mesma concentração. Resultados semelhantes foram reportados em estudos com microverdes de coentro, manjerição verde, manjerição roxo, tatsoi, endro e manjerição submetidos a tratamentos com selenato de sódio nas concentrações de 4, 8 e 12 mg L<sup>-1</sup> (Puccinelli et al., 2020; Sheikhi et al., 2024), bem como em microverdes de trigo enriquecidos com selenito de sódio (Islam et al., 2020).

Na Figura 11, observa-se que por meio do osmocondicionamento das sementes com selenato e selenito de sódio houve aumento do teor de clorofila A nas plântulas. No entanto, o selenito promoveu teores mais elevados do pigmento fotossintético em concentrações mais altas (PEG+10 e PEG+20). Já o selenato teve seu melhor desempenho nas concentrações intermediárias, sobretudo na PEG+5, superando o selenito neste mesmo nível de concentração. Esses resultados sugerem que as duas formas de selênio podem apresentar eficiências diferenciadas na síntese de Clorofila A, variando conforme a fonte aplicada. A clorofila é um pigmento fundamental para a fotossíntese, desempenhando um papel crucial na produção de nutrientes energéticos, principalmente em concentrações elevadas (Zhang *et al.*, 2021). As aplicações de Se promovem incremento na biossíntese de pigmentos fotossintéticos em plantas, contribuindo para o reparo de cloroplastos que podem sofrer danos causados por estresses abióticos e espécies reativas de oxigênio (ROS) (Swapnil *et al.*, 2021).

FIGURA 11. Médias da quantidade de clorofila A (mg g<sup>-1</sup>) de microverdes de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h.



F=8.4200e-07\*; CV=17,27%. F = valor de F calculado e CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas entre fontes e maiúsculas entre doses, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

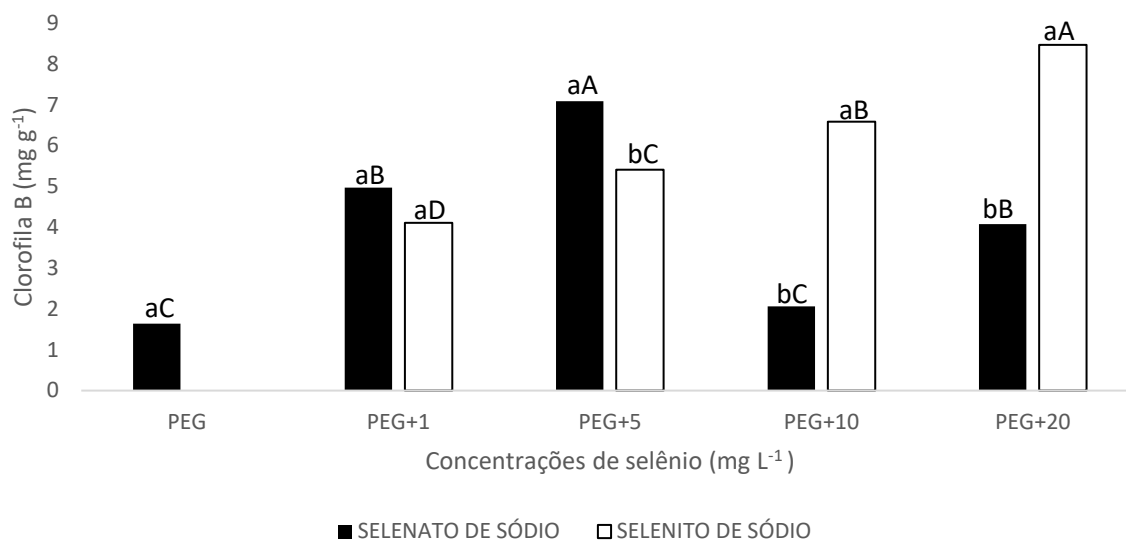
Fonte: o próprio autor

A ausência de selênio (PEG) resultou nos menores teores de clorofila A (Figura 11). Em contrapartida, a concentração 5 mg L<sup>-1</sup> (PEG+5) resultou em aumentos expressivos nos teores de clorofila A para ambas as fontes, indicando um possível ponto ótimo de resposta fisiológica, pois induziu a maior produção do pigmento fotossintético. No entanto, nas concentrações de PEG+10 e PEG+20 mg L<sup>-1</sup>, o selenato de sódio promoveu incrementos inferiores no acúmulo de clorofila A, possivelmente sendo fitotóxico nestas concentrações mais altas.

Por outro lado, o selenito manteve níveis elevados a partir da concentração 5 mg L<sup>-1</sup> (PEG+5), o que reforça a ideia de que o selenito pode ser mais eficaz em altas concentrações. Na concentração de 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG+20), o efeito benéfico do selenito foi ainda mais evidente, atingindo o maior valor observado no experimento, com valores cerca de 5 vezes maiores em comparação ao controle. Esse resultado indica que o selenito de sódio é mais promissor em promover o acúmulo do pigmento fotossintético em condições de maior concentração de selênio.

O selenito também aumentou os teores de clorofila A nos extratos de microverdes de trigo biofortificados com selenito (Islam *et al.*, 2020). Segundo Khan *et al.*, (2023), o selênio em concentrações exatas promove o aumento de clorofila, antioxidante não enzimáticos, que melhorando a eficiência fotossintética.

FIGURA 12. Médias da quantidade de clorofila B ( $\text{mg g}^{-1}$ ) de microverdes de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20  $\text{mg L}^{-1}$  (PEG, PEG+1, PEG+5, PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h.



F=8. 8000.e-07\*; CV=13,3%. F = valor de F calculado e CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas entre fontes e maiúsculas entre doses, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade

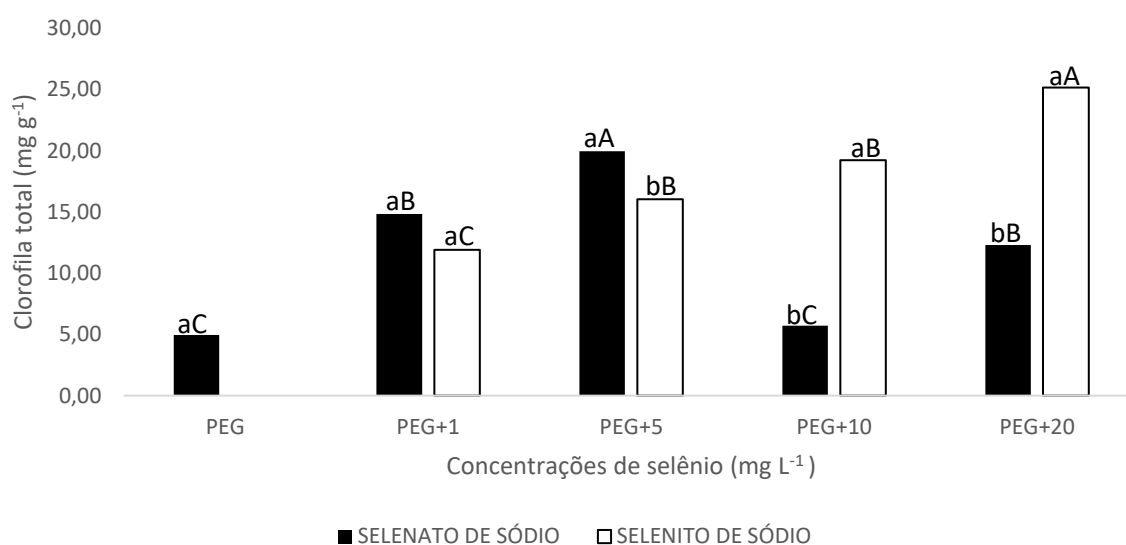
Fonte: o próprio autor

A comparação entre o selenato de sódio e o selenito de sódio revela uma resposta variável dependendo da concentração (Figura 12). Em concentrações baixas e intermediárias, o selenato mais eficiente em promover o acúmulo de clorofila B, contudo, em concentrações mais elevadas o selenito de sódio superou o selenato na promoção deste pigmento acessório. Esse comportamento sugere que o selenito pode ser mais eficaz na proteção dos pigmentos fotossintéticos, possivelmente devido à ativação de mecanismos antioxidantes que evitam a degradação da clorofila.

No tratamento com selenato, a clorofila B aumentou progressivamente de PEG+1 até PEG+5, indicando um ponto ótimo nessa faixa. No entanto, a partir de PEG+10, houve queda acentuada, sugerindo possível efeito tóxico em concentrações mais altas. Já no caso do selenito, o aumento dos teores de clorofila B foi mais contínuo e progressivo, com destaque para os tratamentos PEG+10 e PEG+20, que se mostraram superiores à dose controle e às doses iniciais. Isso indica que o selenito pode apresentar uma maior faixa de tolerância fisiológica, favorecendo a manutenção dos pigmentos mesmo em condições mais severas de estresse hídrico. Conforme Khan *et al.*, (2023), aplicações de selenito tendem a aumentar a produção de

Clorofila B. No estudo conduzido por Viltres-Portales *et al.* (2024), a biofortificação com a mistura de selenito e selenato de sódio não produziu efeitos significativos na concentração de clorofila B em microverdes de couve, couve-rabano e trigo. Os teores de Clorofila B aumentaram em dosagens baixas com selenito em microverdes de trigo (Islam *et al.*, 2020).

FIGURA 13. Médias da quantidade de clorofila total ( $\text{mg g}^{-1}$ ) de microverdes de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20  $\text{mg L}^{-1}$  (PEG, PEG+1, PEG+5, PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h.



$F=1,9400.e-07^*$ ;  $CV=15,82\%$ .  $F$  = valor de  $F$  calculado e  $CV$  = coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas entre fontes e maiúsculas entre doses, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Fonte: o próprio autor

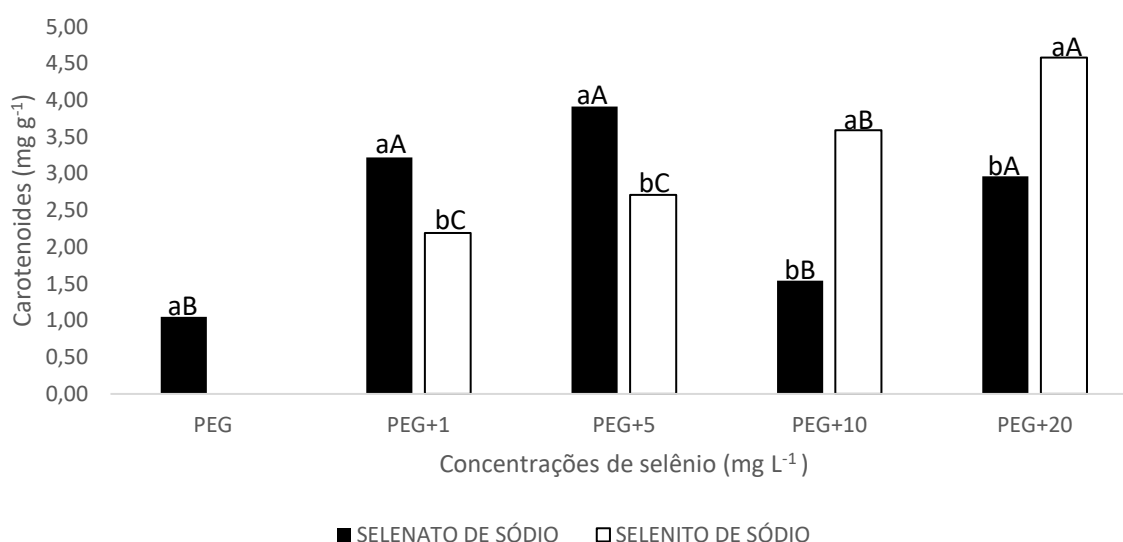
A análise dos teores de clorofila total em microverdes de lentilha submetidos ao osmocondicionamento com diferentes fontes de selênio (Figura 13) evidenciou diferenças significativas entre os tratamentos com selenato e selenito de sódio. Ambas as fontes se mostraram eficazes em aumentar os teores de clorofila total em comparação ao controle (PEG. Conforme Lanza e Reis (2021), a biofortificação com Se influencia a síntese de clorofilas em microverdes que protegem as enzimas do cloroplasto que induzem a produção de ROS.

O tratamento controle (sem selênio) apresentou uma produção de clorofila total de  $4,94 \text{ mg g}^{-1}$ , valor que pode ser atribuído às baixas concentrações naturais de selênio presentes nos microverdes de lentilha. Nas concentrações iniciais (PEG+1 e PEG+5), o selenato induziu a maior síntese de pigmentos fotossintéticos, sendo que na concentração PEG+5, atingiu o maior

valor entre todas as combinações (19,96 mg g<sup>-1</sup>), sendo significativamente superior ao selenito na mesma dose. Isso pode ser um indicativo de que o selenato, por sua maior mobilidade e absorção rápida via transportadores de sulfato, pode estimular mais rapidamente a produção de pigmentos fotossintéticos. Já nas concentrações PEG+10 e PEG+20 mg L<sup>-1</sup>, o selenato apresentou queda acentuada em PEG+10 e PEG+20, o que pode indicar efeitos fitotóxicos em concentrações mais elevadas.

Em relação ao selenito, por sua vez, mostrou uma tendência de incremento progressivo nos teores de clorofila total com o aumento da concentração, atingindo seu máximo em PEG+20, um aumento expressivo no teor de clorofila total em 25,15 mg g<sup>-1</sup>. O selenito embora seja menos móvel, pode oferecer maior proteção antioxidante e preservação da estrutura fotossintética. O selenito aumentou em 3,8% o teor de clorofila total com plântulas de sorgo em comparação ao grupo controle (Nie *et al.*, 2023). Os teores de Clorofila total atingiram os valores máximos em microverdes de trigo tratados com selenito na concentração de 0,50 mg L<sup>-1</sup> (Islam *et al.*, 2020).

FIGURA 14. Médias da quantidade de carotenoides (mg g<sup>-1</sup>) de microverdes de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato de sódio e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h.



F=0,000055\*; CV=20,18%. F = valor de F calculado e CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas entre fontes e maiúsculas entre doses, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

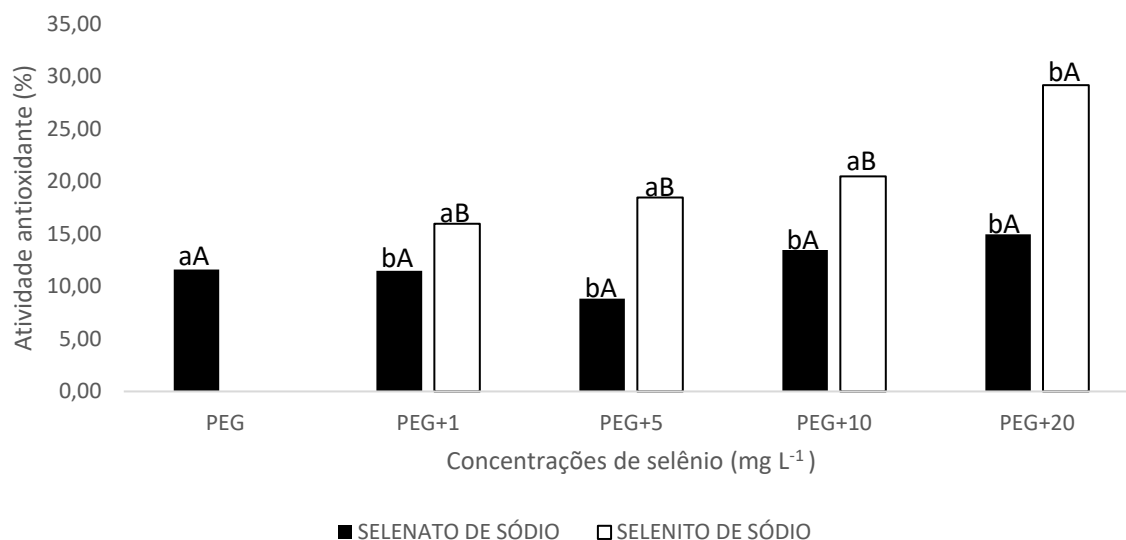
Fonte: o próprio autor

Na Figura 14 pode ser verificado o teor de carotenoides, sendo evidenciado a interação significativa entre as fontes e concentrações de selênio influenciando na biossíntese do pigmento protetor. Os carotenoides são pigmentos protetores contra danos fotooxidativos, em especial contra ROS (Alrifai *et al.*, 2019). A biofortificação de microverdes de couve-rábano com Se resultou em um aumento na concentração de carotenoides, enquanto, para microverdes de couve e trigo, não foram observadas alterações significativas nesse parâmetro (Viltres-Portales *et al.*, 2024).

Na ausência de selênio e na concentração de PEG+10 mg L<sup>-1</sup> com selenato os teores médios de carotenoides foram reduzidos. No entanto, a aplicação de selenato em baixas concentrações (PEG+1 e 5 PEG+mg L<sup>-1</sup>) e na alta concentração (PEG+20 mg L<sup>-1</sup>), durante o osmocondicionamento, aumento no teor de carotenoides nas plântulas em comparação ao controle, com incrementos de 1,47 e 1,44 vezes, respectivamente. Khan *et al.*, (2023), relataram que o selenato aumenta a produção de carotenoides, assim como, Pannico *et al.* (2020), também confirmaram esse aumento em microverdes de tatsoi e manjeriço cultivados em hidroponia. Já o selenito, proporcionou o acréscimo dos pigmentos protetores de forma escalar. No controle, o teor médio de carotenoides foi de 1,05 mg.g<sup>-1</sup>, seguido 2,19; 2,71 mg g<sup>-1</sup> para concentrações PEG+1e PEG+5 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. Nas concentrações de PEG+10 e PEG+20 mg L<sup>-1</sup>, o selenito demonstrou efeito positivo, promovendo a síntese de carotenoides em 4,36 e 3,42 vezes superiores ao controle, respectivamente. Islam *et al.* (2020), verificaram que tratamento com 0,125 mg L<sup>-1</sup> de selenito destacou-se pelo aumento na concentração de carotenoides, sugerindo que essas dosagens baixas podem favorecer a biossíntese ou acumulação desses compostos nos microverdes de trigo. O selênio em concentrações precisas age como antioxidante não enzimáticos, aumentando a concentração de carotenoides, reduzindo os danos nos cloroplastos (Khan *et al.*, 2023).

Tanto o selenato quanto o selenito de sódio influenciam positivamente a síntese de carotenoides em microverdes de lentilha. O selenato é mais eficiente em concentrações baixas (PEG+1-5 mg L<sup>-1</sup>) e na concentração mais elevada (PEG+20 mg L<sup>-1</sup>), enquanto o selenito apresenta melhor desempenho apenas na concentração mais alta (PEG+20 mg L<sup>-1</sup>). Esses achados podem subsidiar estratégias para maximizar o conteúdo de carotenoides em cultivos de lentilha.

FIGURA 15. Médias da atividade antioxidante (%) pelo método DPPH em microverdes de lentilha, cv. BRS Mimi, provenientes de sementes osmocondicionadas com diferentes soluções de selenato e selenito de sódio nas concentrações de 0; 1; 5; 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> (PEG,PEG+1,PEG+5,PEG+10 e PEG+20) a -0,8 MPa por 12h.



F = 0.047082\*; CV=23,07%. F = valor de F calculado e CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas entre fontes e maiúsculas entre doses, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Fonte: o próprio autor

As fontes de selênio revelaram uma diferença expressiva no efeito de cada fonte sobre a atividade antioxidante sobre os microverdes de lentilha (Figura 15). O selenito promoveu uma maior atividade antioxidante em todas as concentrações testadas, diferentemente do selenato que apresentou um efeito mais discreto, sem variações expressivas ao longo das concentrações. Possivelmente o selenito tem maior potencial na indução de mecanismos antioxidantes.

O selenato de sódio manteve valores próximos ao controle (~11% a ~15%), oscilaram pouco entre as concentrações, sem apresentar um padrão claro de resposta dose-dependente. Isso pode indicar uma limitação na capacidade do selenato de estimular os mecanismos antioxidantes nos microverdes de lentilha.

Em contrapartida, no tratamento com selenito de sódio, observou-se um incremento progressivo na atividade antioxidante com o aumento da concentração. Este padrão sugere que doses mais elevadas dessa fonte podem induzir uma resposta adaptativa antioxidante mais robusta, culminando no máximo desempenho em PEG+20, apresentando o maior valor da série (29,18%), significativamente superior ao selenato na mesma dose (14,96%). Silveira *et al.* (2023), verificaram que no *osmoprimering* com Se (selenato de sódio) em sementes de tomate

não resultou em aumento na atividade das enzimas do sistema de defesa antioxidante. No estudo conduzido por Viltres-Portales *et al.* (2024), com microverdes de couve, couve-rábano e trigo atividade antioxidante dos três microgreens não foram afetados pelo tratamento com Se.

De forma geral, observou-se que o selenato e o selenito de sódio exerceram efeitos diferenciados sobre as variáveis avaliadas. O selenito de sódio, em particular, demonstrou maior influência sobre a altura das plântulas, o rendimento de biomassa, o acúmulo de selênio nos tecidos vegetais e o incremento na atividade antioxidante, quando comparado ao selenato de sódio.

Esses resultados evidenciam a interação dependente entre a fonte e a concentração de selênio nos microverdes, reforçando o potencial do osmocondicionamento com Se como uma estratégia eficaz para melhorar a qualidade fisiológica das sementes e nutricional dos microverdes de lentilha.

## **5 CONCLUSÃO**

O condicionamento de sementes com selênio configura-se como uma abordagem promissora para a biofortificação desse micronutriente em lentilhas, promovendo respostas positivas na qualidade fisiológica das sementes e dos microverdes, com variações dependentes da fonte utilizada (selenato ou selenito de sódio) e da concentração aplicada.

## REFERÊNCIAS

- ABAAJEH, A. R.; KINGSTON, C. E.; HARTY, M. Environmental factors influencing the growth and pathogenicity of microgreens bound for the market: a review. **Renewable Agriculture and Food Systems**, [s.l.], v. 38, p. e12, 20 fev. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1017/S174217052300008X>.
- AGUILERA, Y. *et al.* Effect of Illumination on the Content of Melatonin, Phenolic Compounds, and Antioxidant Activity During Germination of Lentils ( *Lens culinaris* L.) and Kidney Beans ( *Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s.l.], v. 62, n. 44, p. 10736–10743, 5 nov. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf503613w>
- AHMAD, R. *et al.* Selenium (Se) improves drought tolerance in crop plants – a myth or fact? **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s.l.], v. 96, n. 2, p. 372–380, 30 jan. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.7231>
- AHMAD, Z. *et al.* Selenium Alleviates the Adverse Effect of Drought in Oilseed Crops Camelina ( *Camelina sativa* L.) and Canola ( *Brassica napus* L.). **Molecules**, [s.l.], v. 26, n. 6, p. 1699, 18 mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26061699>
- AL-OMAIRI, A. A.; AL-HILFY, I. H. Effect of Soaking Maize Seeds with Selenium and Chitosan on Improving Germination, Vigour and Viability of Seed and Seedling. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s.l.], v. 904, n. 1, p. 012075, 1 nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/904/1/012075>
- ALI, A.; BHATTACHARJEE, B. Nutrition security, constraints, and agro-diversification strategies of neglected and underutilized crops to fight global hidden hunger. **Frontiers in Nutrition**, [s.l.], v. 10, n. June, 22 jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1144439>
- ALRIFAI, O. *et al.* Current Review of the Modulatory Effects of LED Lights on Photosynthesis of Secondary Metabolites and Future Perspectives of Microgreen Vegetables. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s.l.], v. 67, n. 22, p. 6075–6090, 5 jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00819>
- ANDERSON, M. *et al.* Selenium enhances ROS scavenging systems and sugar metabolism increasing growth of sugarcane plants. [s.l.], v. 201, n. June, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107798>
- ARNON, D. I. . Copper enzymes in isolated chloroplasts. polyphenoloxidase in *beta vulgaris*. **Plant Physiology**, [s.l.], v. 24, n. 1, p. 1–268, 1949. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- ÁVILA, F. W. *et al.* Assessment of the Anticancer Compounds Se -Methylselenocysteine and Glucosinolates in Se-Biofortified Broccoli ( *Brassica oleracea* L. var. *italica* ) Sprouts and Florets. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s.l.], v. 61, n. 26, p. 6216–6223, 3 jul. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf4016834>

AVNEE *et al.* Biofortification: an approach to eradicate micronutrient deficiency. **Frontiers in Nutrition**, [s.l.], v. 10, n. September, p. 1–16, 14 set. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1233070>

BAYAT, H.; AMINIFARD, M. H. Seed priming with selenium improves growth, water relation and antioxidant activity of pot marigold (*Calendula officinalis* L.) under drought conditions. **Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus**, [s.l.], v. 20, n. 1, p. 27–36, 2021. DOI: <https://doi.org/10.24326/asphc.2021.1.3>

BEZERRA, T. J. *et al.* Importância das condições de armazenamento de microgreens: Análise bibliométrica e revisão de literatura. **Research, Society and Development**, [s.l.], v. 11, n. 3, p. e25211326584, 20 fev. 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26584>

BHASWANT, M. *et al.* Microgreens—A Comprehensive Review of Bioactive Molecules and Health Benefits. **Molecules**, [s.l.], v. 28, n. 2, p. 867, 15 jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28020867>

BHASWANT, M. *et al.* Comparative analysis of macro- and micro-nutrients of *Perilla frutescens* var. *crispa* f. *viridis* microgreens and germinated seeds. **Food Chemistry**, [s.l.], v. 455, n. February, p. 139858, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139858>

BOLDRIN, P. F. *et al.* Genotypic Variation and Biofortification with Selenium in Brazilian Wheat Cultivars. **Journal of Environmental Quality**, [s.l.], v. 47, n. 6, p. 1371–1379, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2018.01.0045>

BONATO, A.; NAGEL, J. C.; SOMMER, L. R. Substratos e qualidade de luz na produção de microverdes. [s.l.], v. 2022, n. cm, p. 1–8, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i13.35448>

BORGHETTI, F.; FERREIRA, A. G. Interpretação de resultados de germinação. Artmed Editora, 2004, [s.l.], p. 209–222. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/303817677\\_Interpretacao\\_de\\_resultados\\_de\\_germinacao](https://www.researchgate.net/publication/303817677_Interpretacao_de_resultados_de_germinacao). Acesso em: 20 janeiro 2025.

BOUALLÈGUE, A. *et al.* Physiological and biochemical changes modulated by seeds' priming of lentil (*Lens culinaris* L.) under salt stress at germination stage. **Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus**, [s.l.], 2019. DOI: <https://doi.org/10.24326/asphc.2019.5.3>

CALLEJA-CABRERA, J. *et al.* Root Growth Adaptation to Climate Change in Crops. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 11, n. May, 8 maio 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00544>

CAO, M. *et al.* *SULTR3;1* is a chloroplast-localized sulfate transporter in

*Arabidopsis thaliana*. **The Plant Journal**, [s.l.], v. 73, n. 4, p. 607–616, 28 fev. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/tpj.12059>

CAROL ANN PATTERSON, JULIANNE CURRAN, T. DER. Effect of Processing on Antinutrient Compounds in Pulses. **Cereal Chemistry**, [s.l.], v. 94, n. 1, p. 2–10, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1094/CCHEM-05-16-0144-FI>

CERITOGLU, M. *et al.* Enhancement of Root System Architecture, Seedling Growth, and Germination in Lentil under Salinity Stress by Seed Priming with Silicon and Salicylic Acid. **Polish Journal of Environmental Studies**, [s.l.], v. 32, n. 5, p. 4481–4491, 8 set. 2023. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/168941>

CHATURVEDI, A. *et al.* Demonstration of lentil cultivation in rice fallow under CFLD programme by Krishi Vigyan Kendra - Tirap, Arunachal Pradesh. **International Journal of Research in Agronomy**, [s.l.], v. 7, n. 2, p. 34–36, 1 fev. 2024. DOI: <https://doi.org/10.33545/2618060X.2024.v7.i2a.277>

CHENG, B. *et al.* Selenium nanomaterials improve the quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) by modulating root growth, nutrient availability, and photosynthesis. **NanoImpact**, [s.l.], v. 29, n. January, p. 100449, jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.impact.2022.100449>

CHOE, U.; YU, L. L.; WANG, T. T. Y. The Science behind Microgreens as an Exciting New Food for the 21st Century. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s.l.], v. 66, n. 44, p. 11519–11530, 7 nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b03096>

CHOUKRI, H. *et al.* Heat and Drought Stress Impact on Phenology, Grain Yield, and Nutritional Quality of Lentil (*Lens culinaris* Medikus). **Frontiers in Nutrition**, [s.l.], v. 7, n. November, p. 1–14, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.596307>

COSTA, Z. L. C. DE M.; SANTOS, S. C. L. Biofortificação de alimentos e sua relação com a segurança alimentar e nutricional: prós e contras. **Research, Society and Development**, [s.l.], v. 11, n. 8, p. e59811831320, 30 jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i8.31320>

D'AMATO, R. *et al.* Selenium Biofortification in Rice (*Oryza sativa* L.) Sprouting: Effects on Se Yield and Nutritional Traits with Focus on Phenolic Acid Profile. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s.l.], v. 66, n. 16, p. 4082–4090, 25 abr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00127>

D'AMATO, R. *et al.* Current Knowledge on Selenium Biofortification to Improve the Nutraceutical Profile of Food: A Comprehensive Review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s.l.], v. 68, n. 14, p. 4075–4097, 8 abr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00172>

DAS, J. K.; PADHANI, Z. A. Alleviating hidden hunger: an infallible bridge to improved health and nutrition. **The Lancet Global Health**, [s.l.], v. 10, n. 11, p. e1539–e1540, nov. 2022. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(22\)00421-1](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(22)00421-1)

DENG, B. *et al.* A simple, rapid and efficient method for essential element supplementation based on seed germination. **Food Chemistry**, [s.l.], v. 325, n. April, p. 126827, set. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126827>

DEVIKA, O. S. *et al.* Seed Priming: A Potential Supplement in Integrated Resource Management Under Fragile Intensive Ecosystems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [s.l.], v. 5, n. July, p. 1–11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.654001>

DHALIWAL, S. S. *et al.* Biofortification—A Frontier Novel Approach to Enrich Micronutrients in Field Crops to Encounter the Nutritional Security. **Molecules**, [s.l.], v. 27, n. 4, p. 1340, 16 fev. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27041340>

DHULL, S. B.; KINABO, J.; UEBERSAX, M. A. **Nutrient profile and effect of processing methods on the composition and functional properties of lentils (*Lens culinaris* Medik): A review.** **Legume Science**, [s.l.], 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/leg3.156>

EBERT, A. W. Sprouts and Microgreens—Novel Food Sources for Healthy Diets. **Plants**, [s.l.], v. 11, n. 4, p. 571, 21 fev. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11040571>

EDMOND, J.B.; DRAPALA, W.J. The Effects of Temperature, Sand and Soil, and Acetone on Germination of Okra Seed. *Proceedings of the American Society Horticultural Science*, v. 71, p. 428-434, 1958. Acesso em 20 janeiro 2025.

EKANAYAKE, L. J. *et al.* Selenium fertilization on lentil ( *Lens culinaris* Medikus ) grain yield , seed selenium concentration , and antioxidant activity. **Field Crops Research**, [s.l.], v. 177, p. 9–14, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.002>

EKUMAH, J. N. *et al.* Global soil distribution, dietary access routes, bioconversion mechanisms and the human health significance of selenium: A review. **Food Bioscience**, [s.l.], v. 41, n. March, p. 100960, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100960>

FACCHINETTI, V. *et al.* Selenium, an Essential Element to Human Life. **Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas(Colombia)**, [s.l.], v. 51, n. 2, p. 589–624, 2022. DOI: <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v51n2.105102>

FAO, F. AND A. O. OF THE U. N. *et al.* **The State of Food Security and Nutrition in the World 2024.** [s.l.], FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO;, 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/agrifood-economics/publications/detail/en/c/1707842/> . Acesso em: 20 janeiro 2025.

FAROOQ, M. *et al.* Impact of Abiotic Stresses on Grain Composition and Quality in Food Legumes. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s.l.], v. 66, n. 34, p. 8887–8897, 29 ago. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b02924>

FAROOQ, M. *et al.* Seed priming in field crops: potential benefits, adoption and challenges. **Crop and Pasture Science**, [s.l.], v. 70, n. 9, p. 731, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP18604>

GALIENI, A. *et al.* Sprouts and Microgreens: Trends, Opportunities, and Horizons for Novel Research. **Agronomy**, [s.l.], v. 10, n. 9, p. 1424, 19 set. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091424>

GHASSEMI-GOLEZANI, K., *et al.* (2008). Efeitos do hidro e do osmo-priming na germinação de sementes e emergência de lentilha em campo (*Lens culinaris* Medik.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 36(1), 29–33. DOI: <https://doi.org/10.15835/nbha36186>

GAN, R. Y. *et al.* Bioactive compounds and bioactivities of germinated edible seeds and sprouts: An updated review. **Trends in Food Science and Technology**, [s.l.], v. 59, p. 1–14, 2017a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.11.010>

GAN, R. Y. *et al.* Hot Air Drying Induces Browning and Enhances Phenolic Content and Antioxidant Capacity in Mung Bean (*Vigna radiata* L.) Sprouts. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s.l.], v. 41, n. 1, p. 1–8, 2017b. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.12846>

GARCIA-CASAL, M. N. *et al.* Staple crops biofortified with increased vitamins and minerals: considerations for a public health strategy. **Annals of the New York Academy of Sciences**, [s.l.], v. 1390, n. 1, p. 3–13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/nyas.13293>

GARG, M., *et al.* (2018). Biofortification in Pulses. In *Biofortification of Food Crops* (pp.193–203). Springer. DOI: 10.3389/fnut.2018.00012

GIOIA, F. *et al.* Microgreens: From trendy vegetables to functional food and potential nutrition security resource. **Acta Horticulturae**, [s.l.], v. 1321, p. 235–241, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1321.31>

GUI, J.-Y. *et al.* Interaction between selenium and essential micronutrient elements in plants: A systematic review. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 853, n. September, p. 158673, dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158673>

GUPTA, M.; GUPTA, S. An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 7, n. January, p. 1–14, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074>

HASANUZZAMAN, M. *et al.* Selenium in plants: Boon or bane? **Environmental and Experimental Botany**, [s.l.], v. 178, n. June, p. 104170, out. 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104170>

HASANUZZAMAN, M. *et al.* Selenium Toxicity in Plants and Environment: Biogeochemistry and Remediation Possibilities. **Plants**, [s.l.], v. 9, n. 12, p. 1711, 4 dez. 2020b. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9121711>

HORO, A. Market integration and price transmission amongst the major wholesale and retail markets of lentil (*Lens culinaris* / *lens esculenta*) in India. **Agricultural Science Digest**, [s.l.], v. 41, n. Speacial Issue, p. 137–143, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18805/ag.D-5180>

HU, F. QIN *et al.* Seed priming with selenium: Effects on germination, seedling growth, biochemical attributes, and grain yield in rice growing under flooding conditions. **Plant Direct**, [s.l.], v. 6, n. 1, p. 1–10, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.1002/pld3.378>

HU, J. *et al.* Seleno-Amino Acids in Vegetables: A Review of Their Forms and Metabolism. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 13, n. February, 2022b. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.804368>

HUANG, Q. Q. *et al.* Application of X-ray absorption near edge spectroscopy to the study of the effect of sulphur on selenium uptake and assimilation in wheat seedlings. **Biologia Plantarum**, [s.l.], v. 61, n. 4, p. 726–732, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10535-016-0698-z>

HUANG, Y. *et al.* Influence of Selenium Biofortification of Soybeans on Speciation and Transformation during Seed Germination and Sprouts Quality. **Foods**, [s.l.], v. 11, n. 9, p. 1200, 20 abr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11091200>

HUSSAIN, S. *et al.* Seed Priming Alters the Production and Detoxification of Reactive Oxygen Intermediates in Rice Seedlings Grown under Sub-optimal Temperature and Nutrient Supply. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 7, n. APR2016, p. 1–13, 5 abr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00439>

HUSSAIN, S. *et al.* Selenium seed priming enhanced the growth of salt-stressed Brassica rapa L. through improving plant nutrition and the antioxidant system. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 13, n. January, p. 1–13, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1050359>

ISHTIAQ, M. *et al.* Seed Priming with the Selenium Nanoparticles Maintains the Redox Status in the Water Stressed Tomato Plants by Modulating the Antioxidant Defense Enzymes. **Plants**, [s.l.], v. 12, n. 7, p. 1556, 4 abr. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12071556>

ISLAM, M. Z. *et al.* Influence of selenium biofortification on the bioactive compounds and antioxidant activity of wheat microgreen extract. **Food Chemistry**, [s.l.], v. 309, n. October 2019, p. 125763, mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125763>

ISMAEL, M. A. *et al.* Cadmium in plants: uptake, toxicity, and its interactions with selenium fertilizers. **Metallomics**, [s.l.], v. 11, n. 2, p. 255–277, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1039/C8MT00247A>

IZYDORCZYK, G. *et al.* Biofortification of edible plants with selenium and iodine – A systematic literature review. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 754, p. 141983, fev. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141983>

JOHNSON, N. *et al.* Targeted improvement of plant-based protein: Genome-wide association mapping of a lentil (*Lens culinaris* Medik.) diversity panel. **Plants People Planet**, [s.l.], v. 6, n. 3, p. 640–655, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppp3.10470>

JONES, G. D. *et al.* Selenium deficiency risk predicted to increase under future climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [s.l.], v. 114, n. 11, p. 2848–2853, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1611576114>

JOSHI, M.; TIMILSENA, Y.; ADHIKARI, B. Global production, processing and utilization of lentil: A review. **Journal of Integrative Agriculture**, [s.l.], v. 16, n. 12, p. 2898–2913, dez. 2017. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61793-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61793-3)

KAALE, L. D.; SIDDIQ, M.; HOOPER, S. Lentil (*Lens culinaris* Medik) as nutrient-rich and versatile food legume: A review. **Legume Science**, [s.l.], v. 5, n. 2, p. 1–11, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/leg3.169>

KHALIQ, A. *et al.* Seed priming with selenium: Consequences for emergence, seedling growth, and biochemical attributes of rice. **Biological Trace Element Research**, [s.l.], v. 166, n. 2, p. 236–244, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-015-0260-4>

KHAN, M. A. *et al.* Seed priming: An overview of techniques, mechanisms, and applications. **Plant Science Today**, [s.l.], v. 11, n. 1, p. 553–563, 10 jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.14719/pst.2828>

KHAN, Z. *et al.* The role of selenium and nano selenium on physiological responses in plant: a review. **Plant Growth Regulation**, [s.l.], v. 100, n. 2, p. 409–433, 24 jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10725-023-00988-0>

KRZYZANOWSKI, F. C. *et al.* **Vigor de Sementes: Conceitos e Testes**. [s.l.], Informativo ABRATES, 2017. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/446594>. Acesso em 20 janeiro 2025.

KUMAR, J. *et al.* Current Knowledge on Genetic Biofortification in Lentil. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s.l.], v. 64, n. 33, p. 6383–6396, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b02171>

KYRIACOU, M. C. *et al.* Micro-scale vegetable production and the rise of microgreens. **Trends in Food Science and Technology**, [s.l.], v. 57, p. 103–115, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.005>

LANZA, M. G. D. B.; REIS, A. R. DOS. Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s.l.], v. 164, p. 27–43, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.026>

LEI, C. *et al.* Osmopriming with polyethylene glycol (Peg) for abiotic stress tolerance in germinating crop seeds: A review. **Agronomy**, [s.l.], v. 11, n. 11, p. 1–12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11112194>

LEMMENS, E. *et al.* Impact of Cereal Seed Sprouting on Its Nutritional and Technological Properties: A Critical Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, [s.l.], v. 18, n. 1, p. 305–328, 12 jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12414>

LIU, H. *et al.* Effects of elicitation on bioactive compounds and biological activities of sprouts. **Journal of Functional Foods**, [s.l.], v. 53, n. 13, p. 136–145, fev. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.12.019>

LIU, S. *et al.* New perspectives on physiological, biochemical and bioactive components during germination of edible seeds: A review. **Trends in Food Science & Technology**, [s.l.], v. 123, n. February, p. 187–197, maio 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.029>

LIU, X. *et al.* Advances in research on influencing factors of selenium enrichment in plants. **Plant Growth Regulation**, [s.l.], v. 103, n. 2, p. 243–255, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10725-023-01107-9>

LOBO, J. H. As origens da Agricultura. **Revista de História**, [s.l.], v. 38, n. 78, p. 285, 30 jun. 1969. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9141.rh.1969.128784>

LOPES-LUTZ, D. *et al.* Screening of chemical composition, antimicrobial and antioxidant activities of Artemisia essential oils. **Phytochemistry**, [s.l.], v. 69, n. 8, p. 1732–1738, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2008.02.014>

LOUREIRO, M. P. *et al.* Biofortificação de alimentos: problema ou solução? **Segurança Alimentar e Nutricional**, [s.l.], v. 25, n. 2, p. 66–84, 2018. DOI: <https://doi.org/10.20396/san.v25i2.8652300>

LYONS, G. Biofortification of cereals with foliar selenium and iodine could reduce hypothyroidism. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 9, n. June, p. 1–8, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00730>

MA, L. *et al.* Seed osmopriming with polyethylene glycol (PEG) enhances seed germination and seedling physiological traits of *Coronilla varia* L. under water stress. **PLOS ONE**, [s.l.], v. 19, n. 5, p. e0303145, 10 maio 2024. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0303145>

MALAGOLI, M. *et al.* Effects of selenium biofortification on crop nutritional quality. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 6, n. January, 21 abr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00280>

MANSOOR, M. *et al.* Selenium priming enhances the expression of Sec A translocase in

common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **The Nucleus**, [s.l.], 13 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13237-024-00508-z>

MÁRIO SEIXAS, ELISIO CONTINI, C. O. S. Índia O despertar de um gigante do agronegócio. **Política Agrícola**, [s.l.], v. 3, p. 95–113, 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/197507/1/India-o-despertar-de-um-gigante.pdf>. Acesso em: 20 de janeiro de 2025.

MEHRKISH, M.; GHOBADI, M.; HONARMAND, S. J. Evaluation the ability of seed priming with selenium to improving deteriorated seeds in lentil (*Lens culinaris* Medic). **Iranian Journal of Seed Science and Research**, [s.l.], v. 8, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.11.004>

MEJÍA-RAMÍREZ, F. *et al.* Seed Priming Based on Iodine and Selenium Influences the Nutraceutical Compounds in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Crop. **Antioxidants**, [s.l.], v. 12, n. 6, p. 1265, 13 jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox12061265>

MOLNÁR, Á. *et al.* Selenite-induced nitro-oxidative stress processes in *Arabidopsis thaliana* and *Brassica juncea*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s.l.], v. 148, n. August 2017, p. 664–674, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.035>

MOULICK, D.; GHOSH, D.; CHANDRA SANTRA, S. Evaluation of effectiveness of seed priming with selenium in rice during germination under arsenic stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s.l.], v. 109, p. 571–578, dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.11.004>

MOZART, G. G. *et al.* Enhancement of Dairy Cow Milk Quality with Probiotic and Inorganic Selenium Supplementation. **Dairy**, [s.l.], v. 5, n. 2, p. 336–345, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/dairy5020027>

MROCZEK-ZDYRSKA, M.; STRUBIŃSKA, J.; HANAKA, A. Selenium Improves Physiological Parameters and Alleviates Oxidative Stress in Shoots of Lead-Exposed *Vicia faba* L. minor Plants Grown Under Phosphorus-Deficient Conditions. **Journal of Plant Growth Regulation**, [s.l.], v. 36, n. 1, p. 186–199, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00344-016-9629-7>

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. In: KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B. (org.). *Vigor de sementes: conceitos e testes*. Londrina: ABRATES, 2020. p. 2.1–2.24. Acesso em: 29 janeiro 2025.

NASCIMENTO, W. M. Lentilhas muito além do Réveillon.pdf. [s.l.], p. 6, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/49159157/artigo---lentilhas-muito-alem-do-reveillon>. Acesso em: 20 janeiro 2025

NAWAZ, F. *et al.* Selenium (Se) Seed Priming Induced Growth and Biochemical Changes in Wheat Under Water Deficit Conditions. **Biological Trace Element Research**, [s.l.], v. 151, n.

2, p. 284–293, fev. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-012-9556-9>

NEWMAN, R. G. *et al.* Biofortification of Sodium Selenate Improves Dietary Mineral Contents and Antioxidant Capacity of Culinary Herb Microgreens. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 12, n. August, p. 1–9, 5 ago. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.716437>

NIE, M. *et al.* Seed priming with selenite enhances germination and seedling growth of Sorghum [ Sorghum bicolor (L.) Moench] under salt stress. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, [s.l.], v. 73, n. 1, p. 42–53, 31 dez. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064710.2023.2177561>

OHANENYE, I. C. *et al.* Germination as a bioprocess for enhancing the quality and nutritional prospects of legume proteins. **Trends in Food Science and Technology**, [s.l.], v. 101, n. January, p. 213–222, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.003>

PALACIOS, L. T. *et al.* Identification of Macrosperma and Microsperma Lentil ( Lens culinaris Medik) Genotypes with Superior Nutritional, Industrial, and Productive Traits to Get Transgressive Segregants. **ACS Agricultural Science & Technology**, [s.l.], v. 3, n. 8, p. 683–693, 21 ago. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsagscitech.3c00131>

PALOMARES-NAVARRO, M. J. *et al.* Nutritional and Nutraceutical Properties of Selected Pulses to Promote Gluten-Free Food Products. **Plant Foods for Human Nutrition**, [s.l.], v. 78, n. 2, p. 253–260, 8 jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11130-023-01060-y>

PANNICO, A. *et al.* Selenium biofortification impacts the nutritive value, polyphenolic content, and bioactive constitution of variable microgreens genotypes. **Antioxidants**, [s.l.], v. 9, n. 4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox9040272>

PAPARELLA, S. *et al.* Seed priming: state of the art and new perspectives. **Plant Cell Reports**, [s.l.], v. 34, n. 8, p. 1281–1293, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00299-015-1784-y>

PINTO, T. J. B. *et al.* Reaction of Brazilian genotypes of pulses (pea, chickpea and lentil) to the root-knot nematode *Meloidogyne enterolobii*. **Nematology**, [s.l.], v. 51, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1163/15685411-bja10309>

PRITI *et al.* Diversity in Phytochemical Composition, Antioxidant Capacities, and Nutrient Contents Among Mungbean and Lentil Microgreens When Grown at Plain-Altitude Region (Delhi) and High-Altitude Region (Leh-Ladakh), India. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 12, n. July, 30 jul. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.710812>

PRITI *et al.* Yield optimization, microbial load analysis, and sensory evaluation of mungbean (*Vigna radiata* L.), lentil (*Lens culinaris* subsp. *culinaris*), and Indian mustard (*Brassica juncea* L.) microgreens grown under greenhouse conditions. **PLoS ONE**, [s.l.], v. 17, n. 5 May, p. 1–17, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268085>

PUCCINELLI, M. *et al.* Selenium enrichment enhances the quality and shelf life of basil leaves. **Plants**, [s.l.], v. 9, n. 6, p. 1–14, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9060801>

RAHMAN, M. M. *et al.* Enhancing selenium concentration in lentil (*Lens culinaris* subsp. *culinaris*) through foliar application. **Journal of Agricultural Science**, [s.l.], v. 153, n. 4, p. 656–665, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0021859614000495>

RAJ, A. B.; RAJ, S. K. Seed priming: An approach towards agricultural sustainability. **Journal of Applied and Natural Science**, [s.l.], v. 11, n. 1, p. 227–234, 10 mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.31018/jans.v11i1.2010>

RAZA, M. A. S. *et al.* Seed priming with selenium improves growth and yield of quinoa plants suffering drought. **Scientific Reports**, [s.l.], v. 14, n. 1, p. 1–12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51371-6>

REIS, A. R. *et al.* Biofortificação Agronômica Com Selênio No Brasil Como Estratégia Para Aumentar a Qualidade Dos Produtos Agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, [s.l.], v. 8, n. 2, p. 128–138, 2014. DOI: <https://doi.org/10.18011/bioeng2014v8n2p128-138>

REIS, A. R. *et al.* Overview of Selenium Deficiency and Toxicity Worldwide: Affected Areas, Selenium-Related Health Issues, and Case Studies. [s.l.], p. 209–230, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56249-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56249-0_13)

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**, [s.l.], v. 79, p. 508–515, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.01.004>

RIGGIO, G. M. *et al.* Microgreens—A review of food safety considerations along the farm to fork continuum. **International Journal of Food Microbiology**, [s.l.], v. 290, n. October 2018, p. 76–85, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.09.027>

ROCHA, L. *et al.* Seed Soaking with Sodium Selenate as a Biofortification Approach in Bread Wheat: Effects on Germination, Seedling Emergence, Biomass and Responses to Water Deficit. **Agronomy**, [s.l.], v. 12, n. 8, p. 1975, 21 ago. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12081975>

ROMEY, S. L. Z. *et al.* Chemometrics unraveling nutrient dynamics during soybean seed germination. **Microchemical Journal**, [s.l.], v. 164, n. November 2020, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106045>

ROORKIWAL, M. *et al.* Molecular Mechanisms and Biochemical Pathways for Micronutrient Acquisition and Storage in Legumes to Support Biofortification for Nutritional Security. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 12, n. June, 7 jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.682842>

SAHA, U. Selenium in the Soil-Plant Environment: A Review. **International Journal of Applied Agricultural Sciences**, [s.l.], v. 3, n. 1, p. 1, 2017. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ijaas.20170301.11>

SALARIA, S. *et al.* Protein Biofortification in Lentils (*Lens culinaris* Medik.) Toward Human Health. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 13, n. April, 5 abr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.869713>

SANDHU, R. *et al.* A critical review on integrating bio fortification in crops for sustainable agricultural development and nutritional security. **Journal of Agriculture and Food Research**, [s.l.], v. 14, n. October, p. 100830, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100830>

SANTIAGO, M. B.; SOUZA, M. L. R. DE. Uma revisão sobre a deficiência de selênio e a suscetibilidade às infecções virais com ênfase particular no novo coronavírus / A review of selenium deficiency and susceptibility to viral infections with particular emphasis on the new coronavirus. **Brazilian Journal of Health Review**, [s.l.], v. 3, n. 5, p. 11509–11520, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34119/bjhrv3n5-012>

SARIÑANA-NAVARRETE, M. L. Á. *et al.* Selenium Seed Priming and Biostimulation Influence the Seed Germination and Seedling Morphology of Jalapeño (*Capsicum annuum* L.). *Horticulturae*, [s.l.], v. 10, n. 2, p. 119, 25 jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae10020119>

SANTOS, M.; DA SILVA JÚNIOR, F. M. R.; MUCCILLO-BAISCH, A. L. Selenium content of Brazilian foods: A review of the literature values. **Journal of Food Composition and Analysis**, [s.l.], v. 58, p. 10–15, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.01.001>

SARWAR, N. *et al.* Selenium biofortification in food crops: Key mechanisms and future perspectives. **Journal of Food Composition and Analysis**, [s.l.], v. 93, n. June, p. 103615, out. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103615>

SCHIAVON, M. *et al.* Exploring the importance of sulfate transporters and ATP sulphurylases for selenium hyperaccumulation—a comparison of *Stanleya pinnata* and *Brassica juncea* (Brassicaceae). **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 6, n. JAN, p. 1–13, 23 jan. 2015. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00002>

SCHIAVON, M. *et al.* Selenium biofortification in the 21st century: status and challenges for healthy human nutrition. **Plant and Soil**, [s.l.], v. 453, n. 1–2, p. 245–270, 3 ago. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04635-9>

SHARMA, A. *et al.* Factors Affecting Production, Nutrient Translocation Mechanisms, and LED Emitted Light in Growth of Microgreen Plants in Soilless Culture. **ACS Agricultural Science and Technology**, [s.l.], v. 3, n. 9, p. 701–719, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsagscitech.3c00260>

SHARMA, S. *et al.* Vegetable microgreens: The gleam of next generation super foods, their genetic enhancement, health benefits and processing approaches. **Food Research International**, [s.l.], v. 155, n. February, p. 111038, maio 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111038>

SHAUKAT, S. S. *et al.* Effect of on germination , seedling growth , chlolorophyll content and amylase activity of lens culinaris l .: an application of appropriate tool for analysis of germination data. **International journal of biology and biotechnology**, [s.l.], v. 18, n. 3, p. 509–515, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2022210213>

SHEIKHI, H. *et al.* Sodium selenate biofortification, through seed priming, on dill microgreens grown in two different cultivation systems. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 15, n. November, p. 1–15, 27 nov. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1474420>

SHEORAN, S. *et al.* Current Status and Potential of Biofortification to Enhance Crop Nutritional Quality: An Overview. **Sustainability**, [s.l.], v. 14, n. 6, p. 3301, 11 mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14063301>

SHIVAY, Y. S. *et al.* Agronomic interventions for micronutrient biofortification of pulses. **Indian Journal of Agronomy**, [s.l.], v. 61, p. 161–172, 2016. Disponivem em: [https://doi.org/10.3390/su14063301https://www.researchgate.net/publication/340389582\\_Agronomic\\_interventions\\_for\\_micronutrient\\_biofortification\\_of\\_pulses](https://doi.org/10.3390/su14063301https://www.researchgate.net/publication/340389582_Agronomic_interventions_for_micronutrient_biofortification_of_pulses). Acesso em : 20 janeiro 2025

SILVA, D. F. *et al.* Anatomical and physiological characteristics of Raphanus sativus L. submitted to different selenium sources and forms application. **Scientia Horticulturae**, [s.l.], v. 260, n. September 2019, p. 108839, jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108839>

SILVA, N. E. *et al.* Avaliação dos níveis de selênio e glutathione peroxidase em pacientes críticos. **Braspen Journal**, [s.l.], v. 35, n. 3, p. 222–229, 2020. DOI: <https://doi.org/10.37111/braspenj.2020353005>

SILVA, V. M. *et al.* Agronomic biofortification of cowpea with selenium: effects of selenate and selenite applications on selenium and phytate concentrations in seeds. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s.l.], v. 99, n. 13, p. 5969–5983, 24 out. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.9872>

SILVEIRA, A. DE S. *et al.* Osmopriming with selenium: physical and physiological quality of tomato seeds in response to water deficit. **Journal of Seed Science**, [s.l.], v. 45, p. 1–15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v45267349>

SINGH, K. M.; SINGH, A. K. Lentil in India: An Overview. **SSRN Electronic Journal**, [s.l.], 2014. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.2510906>

SITA, K. *et al.* Selenium supplementation to lentil (*Lens culinaris* Medik.) under combined heat and drought stress improves photosynthetic ability, antioxidant systems, reproductive function and yield traits. **Plant and Soil**, [s.l.], v. 486, n. 1–2, p. 7–23, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05310-x>

SIVA, N. *et al.* Can lentil (*Lens culinaris* Medikus) reduce the risk of obesity? **Journal of Functional Foods**, [s.l.], v. 38, p. 706–715, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.02.017>

SIWELA, M. *et al.* Biofortified Crops for Combating Hidden Hunger in South Africa: Availability, Acceptability, Micronutrient Retention and Bioavailability. **Foods**, [s.l.], v. 9, n. 815, p. 1–23, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9060815>

SKRYPNIK, L. *et al.* The Integral Boosting Effect of Selenium on the Secondary Metabolism of Higher Plants. **Plants**, [s.l.], v. 11, n. 24, p. 3432, 8 dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11243432>

SOMAGATTU, P. *et al.* Selenium dynamics in plants: Uptake, transport, toxicity, and sustainable management strategies. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 949, n. July, p. 175033, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175033>

SONG, T. *et al.* The origin of soil selenium in a typical agricultural area in Hamatong River Basin, Sanjiang Plain, China. **Catena**, [s.l.], v. 185, n. October 2019, p. 104355, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104355>

SORS, T. G.; ELLIS, D. R.; SALT, D. E. **Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants**. **Photosynthesis Research**, [s.l.], 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11120-005-5222-9>

SWAPNIL, P. *et al.* Vital roles of carotenoids in plants and humans to deteriorate stress with its structure, biosynthesis, metabolic engineering and functional aspects. **Current Plant Biology**, [s.l.], v. 26, n. July 2020, p. 100203, jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2021.100203>

ŚWIECA, M.; BARANIAK, B. Influence of elicitation with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> on phenolics content, antioxidant potential and nutritional quality of *Lens culinaris* sprouts. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s.l.], v. 94, n. 3, p. 489–496, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.6274>

TAKAHASHI, H. *et al.* The roles of three functional sulphate transporters involved in uptake and translocation of sulphate in *Arabidopsis thaliana*. [s.l.], v. 23, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-313x.2000.00768.x>

TAKAHASHI, H. *et al.* Sulfur assimilation in photosynthetic organisms: Molecular functions and regulations of transporters and assimilatory enzymes. **Annual Review of Plant Biology**, [s.l.], v. 62, p. 157–184, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103921>

TEKLU, D. *et al.* Effectiveness of Agronomic Biofortification Strategy in Fighting against Hidden Hunger. **Agronomy**, [s.l.], v. 13, n. 8, p. 1–14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13082173>

THAVARAJAH, D. *et al.* The potential of lentil (*Lens culinaris* L.) as a whole food for increased selenium, iron, and zinc intake: Preliminary results from a 3 year study. **Euphytica**, [s.l.], v. 180, n. 1, p. 123–128, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-011-0365-6>

THAVARAJAH, D. *et al.* Will selenium increase lentil (*Lens culinaris* Medik) yield and seed quality? **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 6, n. MAY, p. 1–9, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00356>

THAVARAJAH, D. *et al.* Selecting lentil accessions for global selenium biofortification. **Plants**, [s.l.], v. 6, n. 3, p. 1–11, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants6030034>

THUONG, V. T.; MINH, H. G. Effects of growing substrates and seed density on yield and quality of radish (*Raphanus sativus*) microgreens. **Research on Crops**, [s.l.], v. 21, n. 3, p. 579–586, 2020. DOI: <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2020.091>

TITOV, A. F. *et al.* Role of Selenium in Plants, Animals, and Humans. **Biology Bulletin Reviews**, [s.l.], v. 12, n. 2, p. 189–200, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079086422020104>

TRIPPE, R. C.; PILON-SMITS, E. A. H. Selenium transport and metabolism in plants: Phytoremediation and biofortification implications. **Journal of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 404, n. PB, p. 124178, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124178>

UN. **SDGs Report 2023. The Sustainable development Goals Report 2023: Special Edition.** [S.l.], 2023. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>. Acesso em: 20 maio 2025.

VAN HOEWYK, D. A tale of two toxicities: malformed selenoproteins and oxidative stress both contribute to selenium stress in plants. **Annals of Botany**, [s.l.], v. 112, n. 6, p. 965–972, out. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mct163>

VEENA, M.; PUTHUR, J. T. Seed nutrimpriming with zinc is an apt tool to alleviate malnutrition. **Environmental Geochemistry and Health**, [s.l.], v. 44, n. 8, p. 2355–2373, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01054-2>

VILTRES-PORTALES, M. *et al.* Selenium biofortification of microgreens: Influence on phytochemicals, pigments and nutrients. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s.l.], v. 206, n. December 2023, p. 108283, jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108283>

WALLENBERG, M. *et al.* Selenium compounds are substrates for glutaredoxins: A novel

pathway for selenium metabolism and a potential mechanism for selenium-mediated cytotoxicity. **Biochemical Journal**, [s.l.], v. 429, n. 1, p. 85–93, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1042/BJ20100368>

WARNE, T. *et al.* Sustainability Dimensions of a North American Lentil System in a Changing World. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [s.l.], v. 3, n. October, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00088>

WEFFORT, V. R. S.; LAMOUNIER, J. A. Hidden hunger – a narrative review. **Jornal de Pediatria**, [s.l.], v. 100, p. S10–S17, mar. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jped.2023.08.009>

WHITE, P. J.; NEUGEBAUER, K. The genetics of selenium accumulation by plants. In: **Selenium Research for Environment and Human Health: Perspectives, Technologies and Advancements**. [s.l.], CRC Press, 2019. p. 37–38. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429423482-17>

WOCH, W.; HAWRYLAK-NOWAK, B. Selected antioxidant properties of alfalfa, radish, and white mustard sprouts biofortified with selenium. **Acta Agrobotanica**, [s.l.], v. 72, n. 2, p. 1–11, 1 jul. 2019. DOI: <https://doi.org/10.5586/aa.1768>

WOJDYŁO, A. *et al.* Nuts as functional foods: Variation of nutritional and phytochemical profiles and their in vitro bioactive properties. **Food Chemistry: X**, [s.l.], v. 15, p. 100418, out. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100418>

WOLNY, E. *et al.* Germination and the early stages of seedling development in brachypodium distachyon. **International Journal of Molecular Sciences**, [s.l.], v. 19, n. 10, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms19102916>

WU, M. *et al.* Effects of different exogenous selenium on Se accumulation, nutrition quality, elements uptake, and antioxidant response in the hyperaccumulation plant *Cardamine violifolia*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s.l.], v. 204, n. May, p. 111045, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111045>

XIAO, T. *et al.* Overexpression of Wheat Selenium-Binding Protein Gene TaSBP-A Enhances Plant Growth and Grain Selenium Accumulation under Spraying Sodium Selenite. **International Journal of Molecular Sciences**, [s.l.], v. 25, n. 13, p. 7007, 26 jun. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25137007>

XU, M. *et al.* Improvement of the Antioxidative Activity of Soluble Phenolic Compounds in Chickpea by Germination. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s.l.], v. 66, n. 24, p. 6179–6187, 20 jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b02208>

YANCHENKO, A. V.; BUKHAROV, A. F.; FEDOSOV, A. Y. Priming – innovative development of methodology preparation of seeds for sowing (review). **Vegetable crops of Russia**, [s.l.], v. 2, n. 5, p. 28–36, 29 set. 2023. DOI: <https://doi.org/10.18619/2072-9146->

[2023-05-28-36](#)

YANG, H. *et al.* The beneficial and hazardous effects of selenium on the health of the soil-plant-human system: An overview. **Journal of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 422, n. July 2021, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126876>

ZHANG, B. *et al.* **Phytochemicals of lentil (*Lens culinaris*) and their antioxidant and anti-inflammatory effects.** **Journal of Food Bioactives**, [s.l.], 2018. DOI: <https://doi.org/10.31665/JFB.2018.1128>

ZHANG, L. *et al.* Effects of Sodium Selenite and Germination on the Sprouting of Chickpeas (*Cicer arietinum* L.) and Its Content of Selenium, Formononetin and Biochanin A in the Sprouts. **Biological Trace Element Research**, [s.l.], v. 146, n. 3, p. 376–380, 19 jun. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-011-9261-0>

ZHANG, L. *et al.* Os <scp>PT</scp> 2, a phosphate transporter, is involved in the active uptake of selenite in rice. **New Phytologist**, [s.l.], v. 201, n. 4, p. 1183–1191, 11 mar. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.12596>

ZHANG, Y. *et al.* Nutritional quality and health benefits of microgreens, a crop of modern agriculture. **Journal of Future Foods**, [s.l.], v. 1, n. 1, p. 58–66, set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2021.07.001>

ZHANG, Y. Y. *et al.* Revisiting phytate-element interactions: implications for iron, zinc and calcium bioavailability, with emphasis on legumes. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s.l.], v. 62, n. 6, p. 1696–1712, 16 fev. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1846014>

ZHAO, X. Q. *et al.* Involvement of Silicon Influx Transporter OsNIP2;1 in Selenite Uptake in Rice. **Plant Physiology**, [s.l.], v. 153, n. 4, p. 1871–1877, 3 ago. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.110.157867>