

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE MEDICINA  
CURSO BACHARELADO EM NUTRIÇÃO  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ISABELLA DA SILVA SOUZA**

**CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE MICROVERDES DE LENTILHA:  
Resultados em solo tratado com diferentes concentrações de Selênio (*Lens culinaris*  
Medik)**

**UBERLÂNDIA-MG**

**2026**

**ISABELLA DA SILVA SOUZA**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito para obtenção de título de Bacharel em Nutrição pela Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador(a): Érika Maria Marcondes Tassi

**UBERLÂNDIA-MG**

**2026**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me fortalecer e iluminar cada etapa desta jornada acadêmica, concedendo-me sabedoria, perseverança e serenidade para concluir este trabalho. A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), expresse minha sincera gratidão pela concessão da bolsa, que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa e contribuiu de maneira essencial para a minha formação científica. A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), agradeço pela colaboração e pelo fornecimento das amostras utilizadas neste estudo, sem as quais a realização deste trabalho não teria sido possível. A minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Erika Maria Marcondes Tassi, deixo meu profundo agradecimento pela oportunidade, pela confiança, pela dedicação e por todo apoio oferecido ao longo da construção deste projeto. Sua orientação foi fundamental para o meu crescimento acadêmico e profissional. A minha coorientadora, Dr<sup>a</sup> Danielle Borges de Oliveira, agradeço pela disponibilidade, pelas contribuições técnicas e pela parceria constante, que enriqueceram de forma significativa este trabalho. A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste estudo, deixo registrado o meu mais sincero agradecimento.

<b>RESUMO</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>7</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>8</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Proteína de origem vegetal: Qualidade e Importância nutricional</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Lentilha (Lens culinaris Medik) e Microverdes</b>	<b>12</b>
<b>2.3 Selênio: Papel nutricional e Estratégias de biofortificação</b>	<b>15</b>
<b>2.4 Análises físico-químicas: Fundamentos e Aplicações no controle de qualidade</b>	<b>16</b>
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Determinação de umidade</b>	<b>17</b>
<b>3.2 Determinação de proteínas</b>	<b>18</b>
<b>3.3 Determinação de antioxidantes DPPH</b>	<b>19</b>
<b>3.4 Determinação de carotenoides e clorofila a, b e total</b>	<b>19</b>
<b>3.5 Análises estatísticas</b>	<b>21</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>21</b>
<b>4.1 Determinação de proteínas</b>	<b>21</b>
<b>4.2 Determinação de umidade e Determinação de antioxidantes DPPH</b>	<b>24</b>
<b>4.3 Carotenoides (Betacaroteno)</b>	<b>27</b>
<b>4.4 Clorofila A, B e Total</b>	<b>30</b>
<b>4.4.1 Clorofila A</b>	<b>31</b>
<b>4.4.2 Clorofila B</b>	<b>32</b>
<b>4.4.3 Clorofila Total</b>	<b>33</b>
<b>5. CONCLUSÃO</b>	<b>34</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b>	<b>36</b>

**CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE MICROVERDES DE LENTILHA: Os resultados em solo tratado com diferentes concentrações de Selênio (*Lens culinaris* Medik)**

**PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF LENTIL MICROGREEN CROPS: Results in soil treated with different concentrations of Selenium (*Lens culinaris* Medik)**

**CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LOS CULTIVOS DE MICROVEGETALES DE LENTEJAS: Resultados en suelo tratado con diferentes concentraciones de Selenio (*Lens culinaris* Medik)**

**Isabella da Silva Souza**

Graduada em Nutrição  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil  
isabella05silvasouza@hotmail.com

**Marcos de Souza Gomes**

Doutorado em Agroquímica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil  
marcos.gomes@ufu.br

**Danielle Oliveira Borges**

Doutora em Engenharia Química  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil  
[danielle@ufu.br](mailto:danielle@ufu.br)

**Erika Maria Marcondes Tassi**

Doutora em Ciência dos Alimentos  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil  
erikatassi@ufu.br

**Vivian Consuelo Reolon Schmidt**

Doutora em Engenharia de Alimentos  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil  
vivianfeq@ufu.br

**Quintiliano Siqueira Schroden Nomelini**

Doutor em Agronomia, linha de concentração fitotecnia  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil  
quintiliano.nomelini@ufu.br

## RESUMO

A lentilha (*Lens culinaris* Medik), embora amplamente consumida na forma de grãos, ainda é pouco explorada no estágio de microverdes. Os microverdes têm se destacado pelo elevado valor nutricional e pela presença de compostos bioativos, sendo considerados alimentos promissores para a promoção da saúde. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar as características físico-químicas e o conteúdo de compostos bioativos em microverdes de lentilha submetidos à biofortificação com selênio, nas formas de selenato e selenito de sódio, em diferentes concentrações. As sementes de lentilha foram fornecidas pela EMBRAPA e os microverdes foram cultivados por 12 dias no Laboratório de Sementes da Universidade Federal de Uberlândia, campus Umuarama. Utilizou-se solo tratado com diferentes concentrações de selênio (0, 1, 5, 10 e 20%). Foram realizadas análises de determinação de umidade, teor de proteínas pelo método de Kjeldahl, atividade antioxidante pelo método DPPH e quantificação de carotenoides e clorofilas (a, b e total). Os resultados foram analisados em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial  $(2 \times 4) + 1$  adicional. Os microverdes apresentaram elevado teor de umidade, variando entre 88,8% e 89,8%, sem diferenças significativas entre os tratamentos. O teor de proteínas (%) apresentou aumento significativo nos tratamentos com selenito de sódio, destacando-se a concentração de 5% (61,4%), superior ao controle (42,4%). Em relação à atividade antioxidante (%AA), os maiores valores foram observados nos tratamentos com selenito nas concentrações de 10% (20,50%AA) e 20% (29,20%AA), diferindo significativamente do controle (11,63%AA). Para os carotenoides (mg/g), os maiores teores foram observados nas concentrações de 20% de selenato (0,1416 mg/g) e selenito (0,1504 mg/g). Já os maiores valores de clorofila total ( $\mu\text{g/g}$  de matéria seca) foram obtidos com 20% de selenito (2,0881  $\mu\text{g/g}$  de matéria seca). De modo geral, verificou-se que a resposta dos microverdes variou conforme a forma química e a concentração de selênio aplicada, com destaque para o selenito de sódio, que promoveu maior incremento nos parâmetros antioxidantes, proteicos e nos pigmentos fotossintéticos. Assim, a biofortificação com selênio demonstrou potencial para aumentar o valor nutricional e funcional de microverdes de lentilha, evidenciando sua aplicabilidade no desenvolvimento de alimentos com maior valor agregado.

**Palavras-chave:** Alimentos funcionais; Atividade antioxidante; Biofortificação; Selênio; Compostos bioativos.

## ABSTRACT

Although lentils (*Lens culinaris* Medik) are widely consumed as whole seeds, they remain largely unexplored as microgreens. Microgreens have gained attention for their high nutritional value and the presence of bioactive compounds, and are considered promising foods for promoting health. In this context, the present study aimed to evaluate the physicochemical characteristics and the content of bioactive compounds in lentil microgreens subjected to biofortification with selenium, in the forms of sodium selenate and sodium selenite, at different concentrations. The lentil seeds were supplied by EMBRAPA, and the microgreens were grown for 12 days at the Seed Laboratory of the Federal University of Uberlândia, Umuarama campus. Soil treated with different concentrations of selenium (0, 1, 5, 10, and 20%) was used. Analyses were conducted to determine moisture content, protein content using the Kjeldahl method, antioxidant activity using the DPPH method, and quantification of carotenoids and chlorophylls (a, b, and total). The results were analyzed using a completely randomized design in a factorial scheme ( $2 \times 4$ ) + 1 additional treatment. The microgreens had a high moisture content, ranging from 88.8% to 89.8%, with no significant differences among the treatments. Protein content (%) showed a significant increase in the treatments with sodium selenite, particularly at the 5% concentration (61.4%), which was higher than that of the control (42.4%). Regarding antioxidant activity (%AA), the highest values were observed in the selenite treatments at concentrations of 10% (20.50%AA) and 20% (29.20%AA), differing significantly from the control (11.63%AA). For carotenoids (mg/g), the highest levels were observed at concentrations of 20% selenate (0.1416 mg/g) and selenite (0.1504 mg/g). The highest values of total chlorophyll ( $\mu\text{g/g}$  of dry matter) were obtained with 20% selenite (2.0881  $\mu\text{g/g}$  of dry matter). Overall, it was found that the response of the microgreens varied according to the chemical form and concentration of selenium applied, with sodium selenite standing out as it promoted the greatest increase in antioxidant, protein, and photosynthetic pigment parameters. Thus, selenium biofortification demonstrated potential to increase the nutritional and functional value of lentil microgreens, highlighting its applicability in the development of foods with higher added value.

**Keywords:** Functional foods; Antioxidant activity; Biofortification; Selenium; Bioactive compounds.

## RESUMEN

La lenteja (*Lens culinaris Medik*), aunque se consume ampliamente en forma de grano, aún está poco explotada en su fase de microverduras. Los microverduras se han destacado por su elevado valor nutricional y por la presencia de compuestos bioactivos, por lo que se consideran alimentos prometedores para la promoción de la salud. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar las características físico-químicas y el contenido de compuestos bioactivos en microverduras de lenteja sometidas a biofortificación con selenio, en forma de selenato y selenito de sodio, en diferentes concentraciones. Las semillas de lenteja fueron suministradas por EMBRAPA y los microverduras se cultivaron durante 12 días en el Laboratorio de Semillas de la Universidad Federal de Uberlândia, campus de Umuarama. Se utilizó suelo tratado con diferentes concentraciones de selenio (0, 1, 5, 10 y 20 %). Se realizaron análisis para determinar la humedad, el contenido de proteínas mediante el método de Kjeldahl, la actividad antioxidante mediante el método DPPH y la cuantificación de carotenoides y clorofilas (a, b y total). Los resultados se analizaron en un diseño completamente aleatorizado con un esquema factorial ( $2 \times 4$ ) + 1 adicional. Los microvegetales presentaron un elevado contenido de humedad, que osciló entre el 88,8 % y el 89,8 %, sin diferencias significativas entre los tratamientos. El contenido de proteínas (%) registró un aumento significativo en los tratamientos con selenito de sodio, destacando la concentración del 5 % (61,4 %), superior a la del control (42,4 %). En cuanto a la actividad antioxidante (%AA), los valores más altos se observaron en los tratamientos con selenito en concentraciones del 10 % (20,50 %AA) y del 20 % (29,20 %AA), difiriendo significativamente del control (11,63 %AA). En cuanto a los carotenoides (mg/g), los mayores contenidos se observaron en las concentraciones del 20 % de selenato (0,1416 mg/g) y selenito (0,1504 mg/g). Por su parte, los mayores valores de clorofila total ( $\mu\text{g/g}$  de materia seca) se obtuvieron con un 20 % de selenito (2,0881  $\mu\text{g/g}$  de materia seca). En general, se observó que la respuesta de las microverduras varió según la forma química y la concentración de selenio aplicada, destacando el selenito de sodio, que promovió un mayor incremento en los parámetros antioxidantes, proteicos y en los pigmentos fotosintéticos. Así, la biofortificación con selenio demostró su potencial para aumentar el valor nutricional y funcional de los microverduras de lenteja, lo que pone de manifiesto su aplicabilidad en el desarrollo de alimentos con mayor valor añadido.

**Palabras clave:** Alimentos funcionales; Actividad antioxidante; Biofortificación; Selenio; Compuestos bioactivos.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos padrões atuais de consumo alimentar, observa-se crescente valorização de produtos que associem praticidade, elevada densidade nutricional e propriedades funcionais. Nesse contexto, os microverdes vêm ganhando destaque como alternativa inovadora e promissora. Os microverdes correspondem a plântulas jovens de hortaliças, legumes ou ervas aromáticas colhidas precocemente, geralmente entre 7 e 21 dias após a germinação, período em que apresentam elevada concentração de metabólitos secundários e compostos bioativos quando comparados a estágios mais avançados de desenvolvimento vegetal (XIAO et al., 2015).

Ainda que espécies como rúcula, beterraba e couve já estejam consolidadas no mercado de microverdes, a lentilha (*Lens culinaris* Medik) ainda é pouco explorada nesse estágio de desenvolvimento, apesar de suas características agrônômicas e nutricionais promissoras (REIS, 2022). Tradicionalmente consumida na forma de grãos em diversas regiões do mundo, a lentilha destaca-se pelo elevado teor de proteínas, fibras e minerais, além da boa adaptabilidade a diferentes condições de cultivo (RAWAL et al., 2019).

Embora o elevado teor proteico dos grãos sugira potencial nutricional para os microverdes, a composição química nessa fase de desenvolvimento pode sofrer alterações decorrentes da intensa atividade metabólica associada à germinação. Durante esse processo, ocorrem modificações bioquímicas capazes de alterar o perfil de proteínas e de substâncias antioxidantes presentes nos tecidos vegetais. Apesar dessas alterações metabólicas, estudos indicam que os microverdes podem apresentar elevada densidade nutricional, incluindo teores expressivos de proteínas e compostos bioativos, frequentemente superiores aos observados em estágios mais avançados de desenvolvimento vegetal (XIAO et al., 2012; KOWITCHAROEN et al., 2021). Dessa forma, a lentilha apresenta potencial para o desenvolvimento de microverdes com elevado valor agregado, especialmente sob a perspectiva da nutrição e da funcionalidade alimentar.

Outro aspecto relevante refere-se ao potencial da lentilha para a biofortificação mineral, especialmente com selênio (Se) (KUMAR et al., 2018). O selênio é um micronutriente essencial associado à regulação de mecanismos antioxidantes e à síntese de compostos bioativos, como fenóis, carotenoides e clorofilas, contribuindo para a melhoria do perfil nutricional das plantas. Além de enriquecer os alimentos, a biofortificação com selênio pode auxiliar na redução de deficiências nutricionais em populações vulneráveis,

especialmente em regiões onde a ingestão desse mineral é insuficiente (KUMAR et al., 2016).

Resultados da literatura demonstram que a aplicação de selênio no solo pode favorecer o aumento do potencial antioxidante em diferentes culturas vegetais, frequentemente associado à maior síntese de compostos fenólicos e à ativação de mecanismos de defesa antioxidante (HARTIKAINEN et al., 2000; SORS et al., 2005; WHITE, 2016; SCHIAVON; PILON-SMITS, 2017; ZOIDIS et al., 2018). Sob essa perspectiva, a atividade antioxidante constitui um importante indicador funcional para avaliação dos efeitos da biofortificação. Estudos envolvendo culturas como arroz (LI et al., 2018), trigo (LARA, 2016) e brócolis (PILON-SMITS et al., 2009) demonstram que a biofortificação com selênio pode promover alterações positivas na composição fitoquímica e no potencial antioxidante dos vegetais. Entretanto, ainda são escassos os estudos relacionados à aplicação dessa estratégia em microverdes de lentilha, o que reforça a relevância científica desta pesquisa.

Apesar do potencial nutricional e funcional, os microverdes apresentam desafios relacionados à elevada atividade de água e à alta perecibilidade, fatores que reduzem a vida útil e aumentam a suscetibilidade a variações de temperatura, exigindo cuidados específicos durante armazenamento e transporte (KYRIACOU et al., 2016; MIR et al., 2017). Dessa forma, a consolidação comercial desses alimentos depende da adequada caracterização de parâmetros físico-químicos e funcionais que assegurem qualidade, estabilidade e segurança ao consumidor (ZHANG et al., 2021).

Diante desse cenário, torna-se necessário compreender como a germinação, o desenvolvimento inicial das plantas e a biofortificação com diferentes formas de selênio influenciam a qualidade físico-química e o potencial funcional dos microverdes de lentilha. A atividade antioxidante é amplamente utilizada como indicador funcional na avaliação de alimentos de origem vegetal, estando associada à presença de compostos bioativos capazes de neutralizar espécies reativas de oxigênio. Entre os métodos empregados para sua determinação, destaca-se o ensaio com o radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil), amplamente utilizado na literatura devido à sua praticidade, sensibilidade e confiabilidade (BRAND-WILLIAMS et al., 1995; PISOSCHI; POP, 2015).

Assim, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação de selenato e selenito de sódio sobre a qualidade físico-química e o conteúdo de compostos bioativos em microverdes de *Lens culinaris* Medik. Para isso, foram analisados os teores de umidade, proteínas, pigmentos fotossintéticos (clorofilas a, b, total e carotenoides) e a atividade antioxidante pelo método DPPH nos diferentes tratamentos, contribuindo para a compreensão

do potencial nutricional e funcional desses microverdes, bem como para o avanço de estudos relacionados à produção de alimentos biofortificados.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Proteína de origem vegetal: Qualidade e Importância nutricional**

As proteínas são moléculas fundamentais na dieta humana, desempenhando papéis importantes na manutenção da massa muscular, nas respostas imunológicas, na sinalização celular e na reparação de tecidos danificados. Por muitos anos, a proteína de origem animal foi considerada a única fonte eficaz contida de todos os aminoácidos essenciais para a saúde humana (CARBONE & PASIAKOS, 2019). No entanto, atualmente reconhece-se que padrões alimentares caracterizados por alto consumo de produtos de origem animal podem estar associados ao aumento do risco de doenças cardiovasculares e obesidade, em parte devido à maior ingestão de gorduras saturadas e colesterol, que contribuem para alterações metabólicas e elevação do LDL-colesterol (NAJJAR, 2023).

As proteínas vegetais, embora historicamente consideradas inferiores às de origem animal, apresentam qualidade nutricional relevante e vêm sendo amplamente estudadas quanto ao seu perfil de aminoácidos e digestibilidade. A avaliação da qualidade proteica é tradicionalmente realizada pelo PDCAAS (Protein Digestibility-Corrected Amino Acid Score) e, mais recentemente, pelo DIAAS (Digestible Indispensable Amino Acid Score), recomendado pela FAO por refletir com maior precisão a digestibilidade ileal dos aminoácidos essenciais (FAO, 2013; FULLER & TOMÉ, 2005).

Em geral, leguminosas como lentilhas, feijões e grão-de-bico apresentam scores de qualidade proteica moderados, variando aproximadamente entre 0,55 e 0,70, enquanto proteínas isoladas de soja atingem PDCAAS próximo a 1,00, valor amplamente documentado em revisões oficiais de qualidade proteica (FAO, 1991; Young & Pellett, 1994). Já o DIAAS tende a ser inferior ao PDCAAS em alimentos vegetais devido à presença de fatores antinutricionais e diferenças na digestibilidade ileal, embora estudos mostrem melhora significativa após processos de tratamento térmico, germinação ou fermentação (Mathai et al., 2017; Cervantes-Pahm et al., 2014).

Embora algumas proteínas vegetais possuem aminoácidos limitantes, como metionina e cisteína em leguminosas ou lisina em cereais, esse aspecto pode ser superado pela complementaridade proteica, estratégia nutricional consolidada que combina diferentes

grupos alimentares para atingir um perfil aminoacídico adequado (YOUNG & PELLET, 1994).

Além disso, métodos de processamento como germinação, cocção, remoção de casca, fermentação e extrusão podem reduzir compostos antinutricionais presentes em alimentos vegetais, como fitatos, taninos e inibidores de protease, contribuindo para o aumento da digestibilidade das proteínas e da biodisponibilidade de aminoácidos essenciais (GIBSON et al., 2018; SHI et al., 2018). Com isso, apesar das diferenças naturais entre proteínas vegetais e animais, evidências científicas demonstram que uma dieta baseada em uma variedade de fontes vegetais bem combinadas pode suprir adequadamente as necessidades humanas de proteínas e aminoácidos essenciais. As leguminosas, por exemplo, apresentam elevado teor proteico e podem contribuir significativamente para a ingestão diária recomendada de proteínas, dependendo da espécie e da porção consumida (FAO, 2016).

## 2.2 Lentilha (*Lens culinaris* Medik) e Microverdes

A lentilha pertence à família *Papilionaceae*, dentro da ordem *Fabaceae* e apresenta grãos discoides, com um lado plano e outro levemente convexo, encontrados em variedades de cores como verde, vermelha, amarela e preta (USA PULSES, 2025), como representado na Figura 1. É uma das leguminosas cultivadas mais antigas, datando de cerca de 7000 anos na região do Crescente Fértil, considerada berço da agricultura (LIBER et al., 2021).

**Figura 1 – Variedades de lentilha (*Lens culinaris* Medik) em diferentes colorações.**



Fonte: Adaptado de imagens de domínio público (2026).

**Figura 2 – Cultivares de microverde de lentilha (*Lens culinaris* Medik).**



Fonte: Adaptado de imagens de domínio público (2026).

Os grãos de lentilha apresentam teor proteico variando entre 20% e 30% em base seca, dependendo da cultivar, das condições ambientais e do manejo agrícola, sendo considerados importante fonte de proteína vegetal (THAVARAJAH et al., 2011). Além do elevado teor proteico, a lentilha apresenta compostos fenólicos, carotenoides e atividade antioxidante relevante, fatores associados ao seu potencial funcional e nutricional. Seu elevado valor nutricional é amplamente reconhecido, caracterizando-se como um alimento com baixo teor de gordura, aporte energético moderado e alta concentração de proteínas, fibras e micronutrientes, como ferro, zinco e selênio (THAVARAJAH et al., 2011; AGRAWAL et al., 2015).

Por isso, a lentilha é considerada uma ferramenta estratégica para combater deficiências nutricionais e prevenir a desnutrição proteico-energética, além de se destacar na biofortificação voltada à segurança alimentar (SALARIA et al., 2022; KUMAR et al., 2018). Mais recentemente, a espécie tem despertado interesse como microverde, justamente por concentrar, em estágios iniciais de crescimento, quantidades elevadas de compostos bioativos, como fenóis e pigmentos fotossintéticos. Esse potencial torna a lentilha uma candidata promissora para o desenvolvimento de alimentos funcionais e sustentáveis. Estudos indicam que os microverdes podem apresentar maior concentração de compostos bioativos e atividade antioxidante quando comparados a estágios mais avançados de desenvolvimento vegetal. Entretanto, em relação ao teor de proteínas, os resultados podem variar conforme a espécie vegetal, as condições de cultivo e o estágio de crescimento, não sendo possível assumir equivalência direta entre a composição dos grãos e a dos microverdes (XIAO et al., 2012; KOWITCHAROEN et al., 2021).

Os microverdes (ou microgreens) correspondem a plântulas colhidas precocemente, geralmente entre 7 e 21 dias após a germinação, logo após o aparecimento dos cotilédones. Nessa fase de desenvolvimento, os microverdes apresentam caule, uma ou mais folhas

cotiledonares e o primeiro par de folhas verdadeiras, sendo geralmente consumida apenas a parte aérea da planta, sem inclusão do sistema radicular (WIETH, 2019; COSTA et al., 2020). Nesse estágio inicial, o desenvolvimento vegetal caracteriza-se pela elevada concentração de nutrientes e compostos bioativos, como clorofilas, carotenoides e compostos fenólicos, os quais estão associados à atividade antioxidante e a potenciais benefícios à saúde humana (XIAO et al., 2012). Além disso, apresentam teores significativos de vitaminas, minerais e fitoquímicos, incluindo vitamina C, luteína,  $\beta$ -caroteno e compostos fenólicos, que contribuem para a neutralização de radicais livres e para a proteção contra o estresse oxidativo, mecanismos associados à prevenção de doenças crônicas não transmissíveis (ZHANG et al., 2021).

Estudos demonstram que os microverdes podem apresentar concentrações superiores de determinados nutrientes e compostos bioativos quando comparados a hortaliças em estágios mais avançados de desenvolvimento. Xiao et al. (2012), ao avaliarem diferentes espécies de microverdes, observaram maiores concentrações de carotenoides, vitamina C e compostos fenólicos em comparação às respectivas plantas maduras comercialmente disponíveis. Em leguminosas, embora os grãos sejam reconhecidos principalmente pelo elevado teor proteico, os microverdes destacam-se pelo potencial antioxidante e pela elevada concentração de compostos bioativos produzidos durante a germinação e o desenvolvimento inicial da planta. Dessa forma, os microverdes vêm sendo considerados alimentos funcionais promissores, capazes de associar elevada densidade nutricional e potencial antioxidante.

Adicionalmente ao aporte nutricional, os microverdes destacam-se pela praticidade, sabor e apelo estético, fatores que favorecem sua inserção na gastronomia contemporânea. Seu cultivo é rápido, sustentável e requer poucos recursos, podendo ser realizado em áreas urbanas ou mesmo domésticas, o que os torna aliados potenciais da segurança alimentar (XIAO et al., 2012). Do ponto de vista comercial, os microverdes são considerados produtos de alto valor agregado devido ao curto ciclo de produção, elevada densidade nutricional e crescente demanda por alimentos funcionais e sustentáveis. Dados internacionais indicam que os custos de produção podem variar entre US\$5,90 e US\$12,90 por bandeja, enquanto os valores de comercialização podem ultrapassar US\$30,00 em mercados especializados, dependendo da espécie cultivada, escala de produção e mercado consumidor (CALCIX, 2026). No Brasil, os microverdes também apresentam elevado valor comercial, sendo frequentemente comercializados entre R\$10,00 e R\$25,00 por bandeja ou embalagem, especialmente em feiras especializadas, mercados gourmet e restaurantes voltados à gastronomia funcional (SEBRAE, 2022). Apesar da necessidade de cuidados específicos

relacionados à irrigação, luminosidade, higiene e conservação pós-colheita, o cultivo apresenta baixo custo inicial e elevada produtividade em pequenos espaços, favorecendo sua viabilidade econômica e comercial.

A elevada umidade e o metabolismo acelerado dos microverdes reduzem sua vida útil, tornando-os mais suscetíveis à deterioração microbiana, perda de coloração e alterações sensoriais. Dessa forma, sua conservação requer cuidados específicos, como armazenamento sob refrigeração e uso de embalagens adequadas, incluindo atmosfera modificada, especialmente considerando que são frequentemente consumidos crus (Di Gioia et al., 2017; Xiao et al., 2012).

### **2.3 Selênio: Papel nutricional e Estratégias de biofortificação**

A biofortificação consiste em estratégias agrícolas que visam aumentar a concentração de nutrientes em alimentos vegetais, seja por meio de adubação, pulverização foliar ou melhoramento genético. Essa prática é considerada uma ferramenta eficaz no combate à desnutrição, ampliando o acesso a micronutrientes essenciais (WHITE; BROADLEY, 2009). No caso do selênio, a forma química utilizada influencia diretamente sua absorção e mobilidade dentro da planta. O selenato de sódio ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ) é mais facilmente transportado para a parte aérea, enquanto o selenito de sódio ( $\text{SeO}_3^{2-}$ ) tende a apresentar maior retenção nas raízes (ZHANG et al., 2003).

Estudos de biofortificação vegetal relatam que concentrações entre 1 e 20 mg kg<sup>-1</sup> de selênio no substrato ou solução nutritiva têm sido utilizadas com resultados positivos em diferentes espécies vegetais, promovendo aumento no teor de selênio e em compostos antioxidantes sem comprometer significativamente o desenvolvimento das plantas (PILON-SMITS et al., 2009; SCHIAVON; PILON-SMITS, 2017). Entretanto, concentrações elevadas podem causar efeitos tóxicos, como redução do crescimento vegetal e alterações fisiológicas, tornando necessária a definição de faixas adequadas para cada espécie e condição de cultivo. Dessa forma, a utilização de diferentes concentrações de selenato e selenito de sódio torna-se relevante para avaliação dos efeitos da biofortificação sobre a qualidade nutricional e funcional dos microverdes de lentilha.

Estudos têm demonstrado que a adição de selênio ao solo pode favorecer o desenvolvimento vegetal, uma vez que esse elemento pode estimular o sistema antioxidante das plantas, aumentando a atividade de enzimas como a catalase e reduzindo a peroxidação lipídica, o que contribui para maior proteção celular (HARTIKAINEN et al., 2000). Do ponto de vista fisiológico, o selênio participa da composição de aminoácidos como selenocisteína e

selenometionina, essenciais para a formação das selenoproteínas. Essas proteínas desempenham funções antioxidantes importantes, atuando na regulação do estresse oxidativo e na proteção da integridade celular. Dessa forma, a ingestão adequada de selênio está associada a diversos efeitos benéficos à saúde, incluindo suporte ao sistema imunológico e prevenção de doenças relacionadas ao dano oxidativo (RAYMAN, 2012; ZOIDIS et al., 2018; HATFIELD et al., 2014).

## **2.4 Análises físico-químicas: Fundamentos e Aplicações no controle de qualidade**

A análise físico-química de alimentos representa uma etapa fundamental na avaliação da qualidade nutricional e funcional, permitindo caracterizar a composição dos alimentos e compreender fatores relacionados à estabilidade, conservação e potencial tecnológico (DAMODARAN et al., 2019). Entre os parâmetros mais relevantes em vegetais frescos, destaca-se a determinação da umidade, uma vez que esse fator exerce influência direta sobre a conservação e a estabilidade microbiológica, sendo determinante para a vida útil do produto (BELITZ et al., 2019). Em microverdes, o elevado teor de água está associado à alta perecibilidade, tornando essencial o monitoramento desse parâmetro durante estudos de qualidade e conservação.

A determinação de proteínas também possui grande importância nutricional, especialmente em espécies de interesse alimentar como as leguminosas. O teor proteico contribui significativamente para o valor nutricional dos alimentos e pode sofrer alterações em função do processo de germinação e das condições de cultivo (DAMODARAN et al., 2019). Paralelamente aos parâmetros físico-químicos tradicionais, a avaliação de compostos bioativos e da atividade antioxidante tem recebido destaque crescente em estudos envolvendo alimentos de origem vegetal. Compostos como carotenoides e clorofilas apresentam importante função antioxidante e fisiológica, estando relacionados tanto à atividade fotossintética quanto à proteção contra espécies reativas de oxigênio (LICHTENTHALER, 1987). Além disso, esses compostos contribuem para a qualidade nutricional e funcional dos alimentos, especialmente em microverdes, devido ao intenso metabolismo característico dessa fase de desenvolvimento vegetal (XIAO et al., 2012).

Entre os métodos utilizados para determinação da atividade antioxidante, destaca-se o ensaio com o radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil), amplamente empregado devido à praticidade, rapidez e sensibilidade analítica (BRAND-WILLIAMS et al., 1995). A atividade antioxidante está relacionada à capacidade de neutralização de radicais livres, sendo considerada importante indicador funcional em alimentos vegetais (PISOSCHI; POP, 2015).

Dessa forma, a caracterização físico-química e bioativa dos microverdes torna-se essencial para compreender seu potencial nutricional e funcional, bem como os efeitos de estratégias de biofortificação sobre a composição e qualidade desses alimentos.

### 3. METODOLOGIA

O estudo foi conduzido na Universidade Federal de Uberlândia (UFU), envolvendo o Laboratório de Bromatologia (LABRO-FAMED), a Rede de Laboratórios Multiusuários (RELAM-PROPP) e o Laboratório de Sementes (LASEM-ICAG). As sementes de lentilha utilizadas foram fornecidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). O cultivo dos microverdes foi realizado no Laboratório de Sementes (LASEM), localizado no campus Umuarama, em colaboração com pesquisador vinculado à área de Agronomia responsável pela condução da etapa de cultivo. Os microverdes foram cultivados em solo tratado com substrato, utilizando diferentes concentrações de selenato e selenito de sódio aplicadas aos tratamentos experimentais. A colheita foi realizada após 12 dias de cultivo, período correspondente ao estágio característico para consumo de microverdes. As análises físico-químicas foram realizadas em triplicata, seguindo metodologias padronizadas pelo Instituto Adolfo Lutz (2008).

#### 3.1 Determinação de umidade

Na determinação do teor de umidade das amostras de microverde de lentilha utilizou-se a metodologia proposta pela *Association of Official Analytical Chemists* (1985). Em uma estufa a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$ , as placas de petri foram secas por 2 horas e posteriormente resfriadas em dessecador por 15 minutos. Realizou-se então, a identificação desses recipientes, sendo *ST* = sem tratamento; *1%SA* = 1% selenato de sódio; *5%SA* = 5% selenato de sódio; *10%SA* = 10% selenato de sódio; *20%SA* = 20% selenato de sódio; *1%SI* = 1% Selenito de sódio; *5%SI* = 5% Selenito de sódio; *10%SI* = 10% Selenito de sódio; *20%SI* = 20% Selenito de sódio.

Posteriormente, ocorreu a pesagem das placas vazias em balança analítica (precisão  $\pm 0,0001$  g). Após esse processo, os recipientes foram pesados contendo 4 gramas de amostra *in natura* e acomodados em estufa a  $105^\circ\text{C} \pm 3$  por 12h, segundo metodologia. Passados 12h, as placas foram levadas ao dessecador por cerca de 15 minutos, em seguida pesadas novamente, agora contendo as amostras secas. Todos os valores de pesagem foram anotados e sinalizados

para o posterior cálculo de umidade, os resultados foram obtidos considerando a média de cada tratamento.

O teor de umidade e de matéria seca foram determinados conforme as equações 1 e 2:

Equação 1 - Determinação de matéria seca:

$$\% \text{ Matéria seca} = \frac{\text{massa da amostra seca} \times 100}{\text{massa da amostra inicial}}$$

Equação 2 - Determinação de umidade:

$$\% \text{ Umidade} = 100 - \% \text{ Matéria seca}$$

### 3.2 Determinação de proteínas

Para determinação do teor de proteínas, utilizou-se a metodologia proposta pela *Association of Official Analytical Chemists* (1985). A priori, preparou-se e separou-se os reagentes que seriam utilizados nessa análise, foram eles: HCl 0,06N; NaOH 50% [(125g) Na + (125g) H<sub>2</sub>O]; ácido bórico 4% (40g em 1000ml); mistura catalítica [sulfato de sódio (50g) e cobre (5g)]; indicador misto [vermelho de metila 1% em etanol + verde de bromocresol 1% em etanol na proporção de 1:6]; ácido sulfúrico p.a e hidróxido de sódio p.a.

Em uma balança analítica (precisão  $\pm 0,0001$  g), pesou-se 0,2 g de amostra liofilizada em tubo de digestão, ao qual foram adicionados aproximadamente 1 g da mistura catalítica e 4 mL de ácido sulfúrico p.a., escorrendo pela parede interna do tubo. As amostras foram submetidas à digestão em bloco digestor, com aumento gradual da temperatura até 350 °C, mantendo-se a digestão por cerca de 2 horas, sendo prolongada por mais 30 minutos após o clareamento completo da mistura. Depois de resfriada, adicionaram-se 10 mL de água destilada à mistura, agitando até completa dissolução. A determinação proteica foi realizada utilizando amostras previamente liofilizadas, sendo os resultados expressos em base seca.

A solução resultante foi transferida quantitativamente para o destilador, contendo previamente 20 mL de solução de ácido bórico 4% com indicador misto. Em seguida, incluiu-se aproximadamente 15 mL de solução de NaOH 50% e levou-se para o destilador de nitrogênio. A amônia liberada pela amostra foi destilada por arraste até atingir 100 mL de destilado. Por fim, a solução coletada foi titulada com HCl 0,06 N, sendo os resultados expressos em percentual de proteína.

O teor de proteína foi determinado a partir do teor de nitrogênio total, utilizando-se o fator de conversão de 5,75, recomendado para alimentos de origem vegetal (FAO, 2003; MERRILL; WATT, 1973).

Equação 1 - Determinação de teor de nitrogênio:

$$\text{Teor de nitrogênio (\% ou g/100g)} = \frac{\text{NHCl} \times (\text{VHCl} - \text{Vbranco}) \times \text{fHCl} \times 1,4}{\text{P amostra (g)}}$$

Equação 2 - Determinação de teor de proteína:

$$\text{Teor de proteína (\%)} = \text{teor de nitrogênio} \times \text{fator de conversão (FC)}$$

Onde: NHCl corresponde ao teor de nitrogênio obtido a partir da titulação com ácido clorídrico; Vbranco refere-se ao volume de ácido clorídrico (HCl) utilizado na titulação do branco (mL); fHCl corresponde ao fator de correção da solução de ácido clorídrico; e P amostra corresponde à massa da amostra analisada (g).

### 3.3 Determinação de antioxidantes DPPH

A avaliação da atividade antioxidante por meio do método do sequestro dos radicais livres DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) foi realizada de acordo com as metodologias de Lopes-Lutz et al. (2008), seguidas de pequenas modificações. Uma solução etanólica de DPPH foi preparada na concentração de  $40 \mu\text{g mL}^{-1}$ . Para a avaliação, 2,7 mL da solução de DPPH foram adicionados em tubos de ensaio, seguidos da adição de 0,3 mL de cada diluição das amostras de selenato de sódio e selenito de sódio (0; 1; 5; 10 e 20%). Em paralelo, o controle negativo foi preparado contendo todos os reagentes, exceto o extrato. As leituras foram realizadas utilizando o espectrofotômetro no comprimento de onda de 515 nm. A porcentagem da atividade antioxidante (AA%) será calculada utilizando a seguinte equação:

$$\text{AA\%} = [(A_{\text{CN}} - A_{\text{Amo}}) / A_{\text{CN}}] * 100$$

Em que:

$A_{\text{Amo}}$  = Absorbância do DPPH com a amostra.

$A_{\text{CN}}$  = Absorbância do DPPH com o metanol.

### 3.4 Determinação de carotenoides e clorofila a, b e total

A determinação dos pigmentos foi realizada por método espectrofotométrico, com adaptações de metodologias descritas na literatura (LICHTENTHALER, 1987;

RODRIGUEZ-AMAYA, 2001). Para isso, utilizaram-se balança analítica (precisão de  $\pm 0,0001$  g), pipeta automática, tubos Falcon de 50 mL e espectrofotômetro com leituras nos comprimentos de onda de 663, 645, 505 e 453 nm. As amostras vegetais foram previamente maceradas em nitrogênio líquido e submetidas à extração com solução composta por acetona absoluta e hexano absoluto.

Todas as etapas foram realizadas em ambiente protegido da luz, a fim de evitar a degradação dos pigmentos. Inicialmente, as amostras *in natura* foram maceradas em nitrogênio líquido. Em seguida, aproximadamente 1 g da amostra foi pesada em tubo Falcon de 50 mL (registrando-se o peso exato) e adicionados 4 mL de acetona e 6 mL de hexano. Após homogeneização em vortex por 30 segundos, observou-se a formação de duas fases distintas. A fase superior foi coletada em cubeta de vidro e submetida à leitura em espectrofotômetro.

Para o branco, utilizou-se uma solução contendo 4 mL de acetona e 6 mL de hexano. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro previamente calibrado com o branco, nos seguintes comprimentos de onda: clorofila a (663 nm), clorofila b (645 nm), licopeno (505 nm) e  $\beta$ -caroteno (453 nm).

Para tanto, por se tratar de um vegetal, suas quantidades de licopeno não são consideradas significativas, tendo em vista o predomínio de clorofila, responsável pela coloração verde das plantas, além de outros carotenoides como luteína e  $\beta$ -caroteno. Esses por sua vez, estão associados à fotoproteção e ao processo de fotossíntese, sendo o segundo o principal composto analisado no trabalho.

Os resultados obtidos pelas equações espectrofotométricas foram inicialmente expressos em mg/100 mL do extrato. Posteriormente, os valores foram corrigidos pela massa da amostra utilizada na extração, sendo os resultados expressos em mg/g de matéria fresca. Para fins de apresentação e comparação com a literatura, os resultados foram convertidos para mg/100 g de matéria fresca.

Para cada comprimento de onda, o equipamento foi previamente zerado com o branco. Após as leituras, os dados obtidos foram empregados nos cálculos, conforme as equações.

Equação 1: Determinação de Clorofila *a*:

$$\S \text{ Clorofila } a \text{ (mg/100mL): } 0,999 A_{663} - 0,0989 A_{645}$$

Equação 2: Determinação de Clorofila *b*:

$$\S \text{ Clorofila } b \text{ (mg/100mL): } -0,328 A_{663} + 1,77 A_{645}$$

Equação 3: Determinação de Licopeno:

$$\S \text{ Licopeno (mg/100mL): } 0,0458 A_{663} + 0,204 A_{645} + 0,372 A_{505} - 0,0806 A_{453}$$

Equação 4: Determinação de Betacaroteno:

$$\S \text{ Betacaroteno (mg/100mL): } 0,216 A_{663} - 1,22 A_{645} - 0,304 A_{505} + 0,452 A_{453}$$

### 3.5 Análises estatísticas

Para a análise estatística dos dados, os experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial (2 × 4) + 1 adicional, sendo os fatores: fontes de selênio (selenato de sódio e selenito de sódio) e concentrações (1, 5, 10 e 20%), além do tratamento adicional correspondente ao controle (0%). Cada tratamento foi realizado com três repetições.

Inicialmente, os dados foram avaliados quanto aos pressupostos do modelo estatístico, sendo verificada a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro–Wilk, a homogeneidade de variâncias pelo teste de Bartlett e a independência dos resíduos pelo teste de Durbin–Watson. Em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F ou Kruskal-Wallis, ao nível de 5% de significância.

Quando os pressupostos foram satisfeitos, as variáveis umidade e DPPH, com interações não significativas, tiveram os efeitos avaliados de forma independentes. As médias da fonte de selênio foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ), enquanto as médias das doses foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ). Adicionalmente, os tratamentos do esquema fatorial foram comparados com o controle por meio do teste de Dunnett, ao nível de 5% de probabilidade. Para as demais variáveis que tiveram a interação significativa, a comparação das médias foi feita pelos testes de Tukey e Scott-Knott, respectivamente, para concentração dentro de cada nível de selênio e para selênio dentro de cada nível de concentração. Já para as variáveis clorofila B e clorofila total, que não tiveram pressupostos satisfeitos, utilizando da mediana e o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R versão 4.5.0 (R Core Team, 2025).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Determinação de proteínas

Os resultados referentes à determinação de proteínas em microverdes de lentilha biofortificados com selênio estão apresentados na Tabela 1. Na Tabela 3 são apresentadas as

comparações dos tratamentos com os adicionais para todas as variáveis. De forma geral, foi observada interação significativa entre a forma química do selênio e as doses aplicadas ( $p < 0,05$ ). Esse resultado indica que o efeito das doses depende da forma de selênio utilizada no processo de biofortificação. Considerando a comparação entre as concentrações das doses dentro de cada produto (letras maiúsculas), observa-se que o tratamento com selenito de sódio apresentou um aumento no teor de proteínas, destacando-se a dose de 5% (61,4%), que diferiu estatisticamente das demais concentrações. Para o selenato essa diferença foi observada apenas entre as doses de 5% e 1%.

Ao se considerar a comparação entre os produtos dentro de cada concentração das doses utilizadas (letras minúsculas), tem-se como resultado que em todas as doses, o selenito de sódio se destacou significativamente com o aumento dos níveis de proteína nas plântulas. Esse comportamento pode estar relacionado à participação do selênio no metabolismo do nitrogênio e na síntese de aminoácidos, uma vez que esse elemento pode ser incorporado em compostos orgânicos, como selenocisteína e selenometionina, contribuindo para o aumento do teor proteico nos tecidos vegetais (WHITE, 2016; SCHIAVON; PILON-SMITS, 2017).

**Tabela 1:** Determinação de proteínas (b.s.) (médias e desvio padrão) em microverdes de lentilha biofortificados com selênio.

Produto	Dose				
	-	1%	5%	10%	20%
<b>Controle</b>	42,4% b.s.	-	-	-	-
<b>selenato</b>	-	39,5% b.s. <sup>bB</sup>	42,2% b.s. <sup>bA</sup>	41,9% b.s. <sup>bAB</sup>	41,2% b.s. <sup>bAB</sup>
<b>selenito</b>	-	41,6% b.s. <sup>aD</sup>	61,4% b.s. <sup>aA</sup>	56,4% b.s. <sup>aB</sup>	52,8% b.s. <sup>aC</sup>
<b>CV%</b>	2,31				
<b>Pressupostos</b>	<b><math>W = 0,94</math>; <math>B=11,02</math>; <math>DW = 2,73</math></b>				

*Médias seguidas por letras distintas minúsculas na coluna se diferem entre si pelo Tukey e maiúscula na linha se diferem entre si pelo Scott-Knott ao nível de 0,05 de significância; CV: coeficiente de variação da variável sem transformação; W, B e DW: estatísticas dos testes de Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos, Bartlett para homogeneidade de variâncias e Durbin-Watson para independência dos resíduos, respectivamente; Valores em negrito indicam resíduos normalmente distribuídos e independentes e variâncias homogêneas ao nível de 0,05 de significância. B.s. = Base seca.*

**Fonte: Elaborado pela autora (2026)**

Em contraste, os tratamentos com selenato de sódio não apresentaram variações expressivas entre as doses avaliadas, com valores variando entre 39,5% e 42,2%, sugerindo menor influência dessa forma química sobre o teor proteico das plântulas. Quando analisada a

comparação entre as formas de selênio dentro de cada produto (letras maiúsculas), observa-se que o selenito apresentou valores significativamente superiores ao selenato nas doses de 5%, 10% e 20%, evidenciando maior eficiência dessa forma química em promover o aumento do teor de proteínas nos microverdes de lentilha.

Esse comportamento pode estar relacionado às diferenças nos mecanismos de absorção e assimilação das formas de selênio pelas plantas. O selenito tende a ser rapidamente assimilado no metabolismo do enxofre, podendo ser incorporado em aminoácidos sulfurados, como cisteína e metionina, enquanto o selenato apresenta maior mobilidade no sistema vascular e menor assimilação imediata nos tecidos vegetais (SORS et al., 2005; WHITE, 2016).

Dessa forma, a biofortificação com selenito de sódio em concentrações intermediárias (5%) mostrou-se mais eficiente para o aumento do valor proteico em microverdes de lentilha. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, em concentrações moderadas, o selênio atua estimulando o metabolismo do nitrogênio e a síntese de aminoácidos, contribuindo para o aumento do teor proteico. Por outro lado, concentrações mais elevadas podem provocar efeitos adversos, como estresse oxidativo e interferência em processos metabólicos, reduzindo a eficiência fisiológica das plantas. Assim, doses intermediárias tendem a promover melhor equilíbrio entre estímulo metabólico e ausência de toxicidade (WHITE, 2016; SCHIAVON; PILON-SMITS, 2017).

Resultados semelhantes foram relatados por Thavarajah et al. (2015), que observaram incremento no teor proteico e na qualidade nutricional de lentilhas submetidas à biofortificação com selênio aplicado em doses de até 30 g ha<sup>-1</sup>, especialmente na forma de selenito. De forma semelhante, Zhou et al. (2020) verificaram aumento na síntese de proteínas e aminoácidos em vegetais cultivados sob suplementação com selênio em concentrações micromolares. No presente estudo, os microverdes tratados com selenito de sódio apresentaram teores proteicos variando entre 41,6% e 61,4% em base seca (b.s.), com destaque para a dose de 5%, que apresentou aumento de aproximadamente 44,8% em relação ao controle (42,4%).

Esses resultados sugerem que a biofortificação com selênio, especialmente na forma de selenito, pode estimular o metabolismo nitrogenado e favorecer a síntese de aminoácidos e proteínas nos tecidos vegetais. Embora os estudos da literatura apresentem metodologias e unidades experimentais distintas, os resultados observados corroboram a capacidade do selênio de atuar positivamente sobre a composição nutricional de espécies vegetais biofortificadas. Os elevados valores proteicos observados neste estudo devem ser

interpretados em base seca, considerando que a determinação de proteínas foi realizada em amostras previamente liofilizadas. Dessa forma, os resultados não representam a composição do microverde fresco, cuja umidade aproximada foi de 90%.

#### 4.2 Determinação de umidade e Determinação de antioxidantes DPPH

Os resultados obtidos para umidade e atividade antioxidante determinada pelo método DPPH dos microverdes de lentilha estão apresentados na Tabela 2. Na Tabela 3 são apresentadas as comparações dos tratamentos com os adicionais para todas as variáveis. Observa-se que não houve interação significativa entre a forma química do selênio e as doses aplicadas, indicando que os fatores atuaram de forma independente sobre essas variáveis. Considerando o efeito das fontes de selênio, os microverdes tratados com selenato de sódio (89,33%) e selenito de sódio (89,51%) não apresentaram diferenças estatísticas entre si ( $p > 0,05$ ), evidenciando que a forma química do selênio não influenciou na umidade das plântulas.

**Tabela 2:** Determinação de umidade e DPPH (médias) em microverdes de lentilha biofortificados com selênio

<b>Produto</b>	<b>Umidade (%)<sup>1</sup></b>	<b>DPPH (A.A%)<sup>1</sup></b>
<b>Selenato</b>	89,33 a	12,20 b
<b>Selenito</b>	89,51 a	21,03 a
<b>Doses</b>	<b>Umidade (%)<sup>2</sup></b>	<b>DPPH (A.A%)<sup>2</sup></b>
<b>1%</b>	89,14 a	14,98 b
<b>5%</b>	89,72 a	12,40 b
<b>10%</b>	89,46 a	10,16 b
<b>20%</b>	89,36 a	22,10 a
<b>CV%</b>	0,51	21,24
<b>Pressupostos</b>	<b><i>W=0,97; B=6,12</i></b>	<b><i>W = 0,97; B= 3,11;</i></b>
	<b><i>DW=2,88</i></b>	<b><i>DW = 2,71</i></b>

<sup>1</sup> Médias seguidas por letras distintas na coluna se diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 0,05 de significância; <sup>2</sup> Médias seguidas por letras distintas na coluna se diferem entre si pelo teste de Scott-Sknot ao nível de 0,05 de significância CV: coeficiente de variação da variável sem transformação; *W*, *B* e *DW*: estatísticas dos testes de Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos, Bartlett para homogeneidade de variâncias e Durbin-Watson para independência dos resíduos, respectivamente; Valores em negrito indicam resíduos normalmente distribuídos e independentes e variâncias homogêneas ao nível de 0,05 de significância.

**Fonte: Elaborado pela autora (2026)**

De forma semelhante, não foram observadas diferenças significativas entre as doses avaliadas (1%, 5%, 10% e 20%), cujos valores variaram entre 89,14% e 89,72%, indicando que a variação na concentração de selênio não promoveu alterações relevantes na composição hídrica dos microverdes. A comparação entre os tratamentos do esquema fatorial e ao controle, realizada por meio do teste de Dunnett (**Tabela 3**), também não evidenciou diferenças estatísticas significativas ( $p > 0,05$ ), confirmando que a biofortificação com selênio não alterou a umidade do produto.

De modo geral, os microverdes de lentilha apresentaram elevada umidade, próximo a 89%, característica comum nesse estágio de desenvolvimento vegetal. Microverdes são colhidos em fase inicial de crescimento, quando os tecidos vegetais apresentam elevada atividade metabólica e grande proporção de água, o que explica os altos valores observados (XIAO et al., 2012). Embora essa característica contribua para atributos sensoriais desejáveis, como textura e frescor, também representa um desafio para a conservação pós-colheita, uma vez que alimentos com alta atividade de água apresentam maior suscetibilidade ao crescimento microbiano e à deterioração (FRANCO; LANDGRAF, 2018).

**Tabela 3:** Comparação dos tratamentos com os adicionais para variáveis de umidade, DPPH e proteína.

<b>Fatorial</b>	<b>Umidade Adicional Controle (%)</b>	<b>DPPH Adicional Controle (%)</b>	<b>Proteína Adicional Controle (%)</b>
<b>CONTROLE</b>	<b>89,4</b>	<b>11,63</b>	<b>42,4</b>
1% selenato	88,8 <sup>ns</sup>	11,50 <sup>ns</sup>	39,5*
5% selenato	89,8 <sup>ns</sup>	8,83 <sup>ns</sup>	42,2 <sup>ns</sup>
10% selenato	89,6 <sup>ns</sup>	13,47 <sup>ns</sup>	41,9 <sup>ns</sup>
20% selenato	89,2 <sup>ns</sup>	15,00 <sup>ns</sup>	41,2 <sup>ns</sup>
1% selenito	89,5 <sup>ns</sup>	18,47 <sup>ns</sup>	41,6 <sup>ns</sup>
5% selenito	89,7 <sup>ns</sup>	15,97 <sup>ns</sup>	61,4*
10% selenito	89,4 <sup>ns</sup>	20,50*	56,4*
20% selenito	89,5 <sup>ns</sup>	29,20*	52,8*

\*Significativo a comparação entre as médias dos tratamentos do fatorial com relação ao adicional pelo teste de Dunnett ao nível de significância de 0,05; ns: não significativo.

**Fonte: Elaborado pela autora (2026)**

Resultados semelhantes têm sido relatados para microverdes de diferentes espécies, nos quais pequenas variações no teor de umidade podem ocorrer em função de fatores ambientais ou nutricionais, porém geralmente sem impacto significativo na composição final do produto. De acordo com Penello et al. (2020) e Di Bella et al. (2021), os microverdes apresentam, de maneira geral, elevados teores de umidade, frequentemente superiores a 85%, característica inerente ao estágio jovem de desenvolvimento vegetal. Assim, os resultados indicam que a biofortificação com diferentes formas e doses de selênio não interfere na característica de alta umidade dos microverdes de lentilha.

Quanto à determinação da atividade antioxidante, não foi observada interação significativa entre a forma química do selênio e as doses aplicadas, indicando que os fatores atuaram de maneira independente sobre essa variável. Considerando o efeito das fontes de selênio, observa-se que os microverdes tratados com selenito de sódio (21,03) apresentaram atividade antioxidante significativamente superior àqueles tratados com selenato de sódio (12,20) ( $p < 0,05$ ), como retratado na Tabela 3. Esse resultado indica que, embora não tenha havido interação entre os fatores, a forma química do selênio, de maneira isolada, influenciou a capacidade antioxidante dos microverdes de lentilha, possivelmente em função das diferenças nos mecanismos de absorção e assimilação dessas espécies químicas nas plantas.

Em relação às doses avaliadas, verificou-se que a concentração de 20% apresentou maior atividade antioxidante (22,10) em comparação às demais doses (1%, 5% e 10%), as quais não diferiram estatisticamente entre si. A comparação entre os tratamentos do fatorial e ao controle, realizada por meio do teste de Dunnett (**Tabela 3**), evidenciou que os tratamentos com selenito nas concentrações de 10% e 20% apresentaram atividade antioxidante significativamente superior ao controle, indicando que a biofortificação com essa forma de selênio pode potencializar a capacidade de sequestro de radicais livres nos microverdes de lentilha.

Esse efeito pode estar relacionado ao papel do selênio na ativação de mecanismos de defesa antioxidante nas plantas (HARTIKAINEN et al., 2000). Em concentrações adequadas, esse elemento pode estimular a síntese de metabólitos secundários, como compostos fenólicos e pigmentos fotossintéticos (RAMOS et al., 2012), além de participar da regulação de enzimas antioxidantes responsáveis pela neutralização de espécies reativas de oxigênio (ZOIDIS et al., 2018).

Essas semelhanças têm sido relatadas em estudos com plantas biofortificadas com selênio, nos quais o aumento da disponibilidade deste elemento foi associado ao aumento da atividade antioxidante, frequentemente de forma significativa, embora a magnitude da

resposta varie de acordo com a espécie vegetal e a forma química do selênio utilizada (FERNANDES, 2012). Dessa forma, os resultados obtidos indicam que a biofortificação com selenito de sódio, especialmente em concentrações mais elevadas, pode contribuir para o aumento do potencial antioxidante dos microverdes de lentilha.

A maior atividade antioxidante observada nos tratamentos com selenito de sódio também pode estar relacionada às diferenças fisiológicas no metabolismo das formas de selênio nas plantas. O selenito ( $\text{SeO}_3^{2-}$ ) tende a ser rapidamente assimilado nas raízes e incorporado em vias metabólicas associadas ao enxofre, favorecendo a formação de aminoácidos selenados e a ativação de sistemas antioxidantes. Em contrapartida, o selenato ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ) apresenta maior mobilidade no sistema vascular e costuma ser translocado para a parte aérea antes de ser metabolizado, o que pode resultar em menor estímulo imediato aos mecanismos antioxidantes celulares (Sors et al., 2005; White, 2016; Schiavon; Pilon-Smits, 2017). Essas diferenças fisiológicas podem explicar a maior capacidade de sequestro de radicais livres observada nos microverdes biofortificados com selenito neste estudo.

#### 4.3 Carotenoides (Betacaroteno)

Os teores de carotenoides ( $\beta$ -caroteno) nos microverdes de lentilha apresentaram interação significativa ( $p < 0,05$ ) entre as fontes de selênio e as doses aplicadas, conforme demonstrado na Tabela 4. Observou-se que tanto o selenato quanto o selenito promoveram variações nos teores de  $\beta$ -caroteno ao longo das concentrações avaliadas, com tendência de aumento nas maiores doses de selênio. Os maiores teores foram observados na dose de 20%, correspondendo a 14,16 mg/100 g para selenato e 15,04 mg/100 g para selenito.

**Tabela 4:** Determinação de betacaroteno (médias e desvio) em microverdes de lentilha biofortificados com selênio.

Produto	Dose				
	-	1%	5%	10%	20%
Controle	04,42 <sup>MF</sup>	-	-	-	-
Selenato	-	-09,93 <sup>MF bC</sup>	13,69 <sup>MF aA</sup>	07,54 <sup>MF aB</sup>	14,16 <sup>MF aA</sup>
Selenito	-	07,56 <sup>MF aB</sup>	08,05 <sup>MF aB</sup>	12,39 <sup>MF aA</sup>	15,04 <sup>MF aA</sup>
CV%	41,13				
Pressupostos	$W = 0,93; B=14,33; DW = 2,51$				

*Médias seguidas por letras distintas minúsculas na coluna se diferem entre si pelo Tukey e maiúscula na linha se diferem entre si pelo Scott-Knott ao nível de 0,05 de significância; CV: coeficiente de variação da variável sem transformação; W, B e DW: estatísticas dos testes de Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos, Bartlett para homogeneidade de variâncias e Durbin-Watson para independência dos resíduos, respectivamente; Valores em negrito indicam resíduos normalmente distribuídos e independentes e variâncias homogêneas ao nível de 0,05 de significância. ^MF: Resultado em mg/100g de Matéria Fresca.*

**Fonte: Elaborado pela autora (2026)**

O valor negativo registrado no tratamento com 1% de selenato (-9,93 mg/100 g) não possui significado biológico para concentração de carotenoides, podendo estar relacionado a limitações analíticas inerentes ao método espectrofotométrico, especialmente em amostras com baixa concentração do pigmento e possível interferência de clorofilas nas leituras espectrais (LICHTENTHALER, 1987; RODRIGUEZ-AMAYA, 2001). Segundo Rodriguez-Amaya (2001), a sobreposição espectral entre pigmentos vegetais pode ocasionar subestimação ou superestimação dos carotenoides quando as absorvâncias se encontram próximas aos limites de detecção do método.

Os valores observados mostraram-se compatíveis com a literatura para microverdes, os quais apresentam ampla variabilidade no conteúdo de carotenoides em função da espécie, estágio de desenvolvimento e condições de cultivo. Xiao et al. (2012) relataram concentrações de  $\beta$ -caroteno variando de 0,6 a 12,1 mg/100 g em diferentes espécies de microverdes. Os teores observados no presente estudo, especialmente nos tratamentos com maiores doses de selênio, demonstram potencial de incremento no conteúdo desses pigmentos bioativos.

O aumento nos teores de  $\beta$ -caroteno pode estar relacionado ao papel fisiológico dos carotenoides na fotoproteção vegetal. Esses pigmentos participam da dissipação do excesso de energia luminosa e da proteção do aparato fotossintético contra espécies reativas de oxigênio, contribuindo para a estabilidade das membranas celulares e do sistema fotossintético (TAIZ et al., 2017). Dessa forma, a biofortificação com selênio pode ter induzido respostas antioxidantes capazes de favorecer o acúmulo desses compostos. Resultados semelhantes foram observados por Alrifai et al. (2021), que verificaram aumento de 10 a 55% nos carotenoides individuais em microverdes submetidos a diferentes condições ambientais.

A comparação dos tratamentos fatoriais com ao controle, por meio do teste de Dunnett (Tabela 5), evidenciou diferenças significativas para os tratamentos com 1%, 5% e 20% de selenato, além de 20% de selenito. Em contrapartida, os tratamentos com 10% de selenato e 1%, 5% e 10% de selenito não diferiram significativamente do controle. Esses

resultados indicam que o efeito da biofortificação depende não apenas da concentração aplicada, mas também da forma química do selênio utilizado.

**Tabela 5:** Comparação dos tratamentos com os adicionais para variáveis de beta, clorofila A, clorofila B e clorofila Total.

<b>Fatorial</b>	<b>Carotenoides (beta) (mg/100g)</b>	<b>Clorofila A (mg/100g)</b>	<b>Clorofila B<sup>2</sup> (mg/100g)</b>	<b>Clorofila Total<sup>2</sup> (mg/100g)</b>
<b>CONTROLE</b>	<b>04,42</b>	<b>27,35</b>	<b>41,22</b>	<b>68,57</b>
1% selenato	-09,93*	81,93*	118,42*	200,35*
5% selenato	13,69*	107,15*	180,22*	287,37*
10% selenato	07,54 <sup>ns</sup>	30,49 <sup>ns</sup>	48,34 <sup>ns</sup>	78,83 <sup>ns</sup>
20% selenato	14,16*	68,09*	102,39*	170,48*
1% selenito	07,55 <sup>ns</sup>	64,81*	100,85*	165,66*
5% selenito	08,05 <sup>ns</sup>	88,17*	133,06*	221,23*
10% selenito	12,39 <sup>ns</sup>	104,98*	156,73*	261,71*
20% selenito	15,04*	138,43*	208,36*	346,79*

\*Significativo a comparação entre as médias dos tratamentos do fatorial com relação ao adicional pelo teste de Dunnett ao nível de significância de 0,05; ns: não significativo; 2 a comparação entre as medianas dos tratamentos do fatorial com relação ao adicional foi pelo teste de Kruskal-Wallis ao nível de significância de 0,05. Todos os resultados são em mg/100g de matéria fresca.

**Fonte: Elaborado pela autora (2026)**

As diferenças observadas entre selenato e selenito podem estar associadas às distintas vias de absorção, transporte e metabolismo dessas espécies químicas nas plantas, influenciando diretamente o acúmulo de compostos bioativos nos tecidos vegetais (TAIZ et al., 2017). Nesse contexto, Kyriacou et al. (2016) destacam que fatores agrônômicos e nutricionais, incluindo estratégias de biofortificação mineral, exercem influência significativa sobre a composição fitoquímica de microverdes, podendo promover tanto aumento quanto redução nos teores de carotenoides, dependendo da espécie vegetal, da forma química utilizada e das condições de cultivo.

Dessa forma, a biofortificação com selênio demonstrou potencial para incrementar significativamente o conteúdo de carotenoides em microverdes de lentilha, especialmente nos tratamentos com maiores concentrações de selênio, os quais apresentaram diferenças significativas em relação ao controle. Os teores observados mostraram-se compatíveis com a

literatura para microverdes e, em alguns tratamentos, superiores aos valores relatados por Xiao et al. (2012) para diferentes espécies cultivadas em base fresca. Esses resultados indicam que a biofortificação pode contribuir para o aumento do valor nutricional e do potencial funcional desses alimentos. Estratégias desse tipo representam alternativa promissora para produção de alimentos com maior densidade nutricional e maior oferta de compostos antioxidantes na dieta humana (DI GIOIA et al., 2017; XIAO et al., 2012).

#### 4.4 Clorofila A, B e Total

A Tabela 6 apresenta os teores de carotenoides, clorofila A, clorofila B e clorofila total em microverdes de lentilha submetidos à biofortificação com diferentes doses e formas químicas de selênio. Foi observada interação significativa entre as fontes de selênio e as doses aplicadas para as variáveis clorofila A, clorofila B e clorofila total ( $p < 0,05$ ), indicando que a resposta fisiológica das plantas depende simultaneamente da forma química utilizada e da concentração aplicada.

**Tabela 6:** Determinação de Clorofila A, Clorofila B e Clorofila Total (médias) em microverdes de lentilha biofortificados com selênio.

Produto	Dose	Carotenóides (beta) (mg/100g)	Clorofila A (mg/100g)	Clorofila B (mg/100g)	Clorofila Total (mg/100g)
Controle	0%	04,42	27,35	13,67	41,02
Selenato	1%	-09,93 <sup>bc</sup>	81,93 <sup>aB</sup>	41,33 <sup>aA</sup>	123,26 <sup>aB</sup>
	5%	13,69 <sup>aA</sup>	107,5 <sup>aA</sup>	56,59 <sup>aA</sup>	163,74 <sup>aA</sup>
	10%	07,54 <sup>aB</sup>	30,49 <sup>bc</sup>	17,04 <sup>bB</sup>	47,53 <sup>bD</sup>
	20%	14,16 <sup>aA</sup>	68,09 <sup>bB</sup>	45,94 <sup>bA</sup>	101,37 <sup>bC</sup>
Selenito	1%	07,56 <sup>aB</sup>	64,81 <sup>aD</sup>	34,09 <sup>aC</sup>	98,90 <sup>bC</sup>
	5%	08,05 <sup>aB</sup>	88,17 <sup>aC</sup>	44,95 <sup>aB</sup>	133,12 <sup>aB</sup>
	10%	12,39 <sup>aA</sup>	104,98 <sup>aB</sup>	54,67 <sup>aAB</sup>	159,65 <sup>aB</sup>
	20%	15,04 <sup>aA</sup>	138,43 <sup>aA</sup>	70,39 <sup>aA</sup>	208,81 <sup>aA</sup>
CV%		41,13	16,86	21,97	16,24
Pressupostos		$W = 0,93;$ $B=14,33; DW =$	$W = 0,93;$ $B=15,7; DW =$	$W = 0,85;$ $B=27,7; DW =$	$W = 0,88;$ $B=25,2; DW =$

---

**2,51****2,41****2,31****2,24**

---

*Médias seguidas por letras distintas minúsculas na coluna se diferem entre si pelo Tukey e maiúscula na linha se diferem entre si pelo Scott-Knott ao nível de 0,05 de significância; CV: coeficiente de variação da variável sem transformação; W, B e DW: estatísticas dos testes de Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos, Bartlett para homogeneidade de variâncias e Durbin-Watson para independência dos resíduos, respectivamente; Valores em negrito indicam resíduos normalmente distribuídos e independentes e variâncias homogêneas ao nível de 0,05 de significância. Realizado a transformação logarítmica; médias da variável sem transformação. Resultados em mg/100g de Matéria Fresca.*

**Fonte: Elaborado pela autora (2026)**

#### **4.4.1 Clorofila A**

Para os teores de clorofila A, verificou-se comportamento distinto entre as fontes de selênio avaliadas. Nos tratamentos com selenato de sódio, a dose de 5% apresentou o maior valor médio (107,5 mg/100 g), diferindo estatisticamente das doses de 10% (30,49 mg/100 g) e 20% (68,09 mg/100 g). A dose de 10% apresentou comportamento semelhante ao controle, demonstrando menor eficiência dessa concentração em estimular o acúmulo do pigmento.

Nos tratamentos com selenito de sódio, observou-se tendência de aumento progressivo da clorofila A com o incremento das doses, sendo registrado o maior teor na concentração de 20% (138,43 mg/100 g). Além disso, na comparação entre as fontes de selênio dentro de cada dose, o selenito apresentou valores superiores ao selenato nas maiores concentrações, especialmente em 10% e 20%, evidenciando maior eficiência dessa forma química em favorecer o acúmulo do pigmento fotossintético.

Na comparação dos tratamentos com a testemunha pelo teste de Dunnett, verificou-se que praticamente todos os tratamentos apresentaram valores significativamente superiores ao controle ( $p < 0,05$ ), com exceção da dose de 10% de selenato, que não diferiu estatisticamente da testemunha. Esses resultados indicam que a aplicação de selênio favoreceu o aumento dos teores de clorofila A nos microverdes de lentilha, principalmente quando utilizado na forma de selenito.

A clorofila A é o principal pigmento responsável pela absorção de energia luminosa durante a fotossíntese, estando diretamente relacionada à eficiência fotossintética e ao crescimento vegetal (TAIZ et al., 2017). Dessa forma, o aumento desse pigmento sugere melhora na atividade fisiológica das plantas submetidas à biofortificação.

O efeito observado pode estar associado à atuação do selênio no metabolismo antioxidante vegetal. Em concentrações adequadas, esse elemento contribui para a redução de espécies reativas de oxigênio e para a proteção das membranas celulares e dos cloroplastos,

favorecendo a estabilidade do aparato fotossintético e o acúmulo de pigmentos fotossintéticos (HARTIKAINEN et al., 2000; WHITE, 2016).

Entretanto, a literatura também demonstra que concentrações elevadas de selênio podem provocar efeitos tóxicos às plantas, reduzindo o crescimento e o conteúdo de clorofilas em função do desequilíbrio oxidativo e da substituição do enxofre em aminoácidos essenciais (SORS et al., 2005; SCHIAVON; PILON-SMITS, 2017). A faixa entre benefício fisiológico e toxicidade do selênio é considerada estreita, podendo variar conforme a espécie vegetal e a forma química utilizada. Estudos demonstram que concentrações de selenito acima de 1 mg L<sup>-1</sup> já podem reduzir o conteúdo de clorofilas em espécies sensíveis, enquanto concentrações próximas de 10 mg L<sup>-1</sup> podem causar redução do crescimento e clorose, especialmente em sistemas hidropônicos (HASANUZZAMAN et al., 2020; HLAVINKA et al., 2009).

Nesse contexto, os resultados obtidos sugerem que as concentrações utilizadas neste estudo permaneceram dentro de uma faixa fisiologicamente favorável para os microverdes de lentilha, sem evidências de efeitos tóxicos sobre os pigmentos fotossintéticos avaliados. Além disso, o selenito de sódio apresentou maior eficiência em promover o acúmulo de clorofila A nas concentrações mais elevadas.

#### **4.4.2 Clorofila B**

Os resultados referentes à clorofila B também demonstraram interação significativa entre as fontes de selênio e as doses aplicadas ( $p < 0,05$ ). Nos tratamentos com selenato de sódio, observou-se maior teor de clorofila B na dose de 5% (56,59 mg/100 g), diferindo estatisticamente das doses de 10% (17,04 mg/100 g) e 20% (45,94 mg/100 g). Já para os tratamentos com selenito de sódio, verificou-se aumento gradual dos valores com o incremento das concentrações, sendo o maior teor registrado na dose de 20% (70,39 mg/100 g).

Na comparação entre as fontes de selênio dentro de cada dose, o selenito apresentou valores superiores ao selenato nas concentrações mais elevadas, principalmente em 20%, indicando maior eficiência dessa forma química em favorecer o acúmulo de clorofila B. O teste de Dunnett demonstrou que a maioria dos tratamentos diferiu significativamente da testemunha, apresentando maiores teores de clorofila B, com exceção da dose de 10% de selenato, que novamente não apresentou diferença estatística em relação ao controle.

A clorofila B atua como pigmento acessório da fotossíntese, ampliando o espectro de absorção luminosa e transferindo energia para a clorofila A durante o processo fotossintético.

Dessa forma, o aumento desse pigmento pode refletir maior eficiência na captação de luz e melhor desempenho fisiológico das plantas. O aumento observado pode estar relacionado ao papel antioxidante do selênio, que contribui para a proteção dos complexos pigmento-proteína presentes nos cloroplastos, reduzindo danos oxidativos e favorecendo a manutenção da integridade estrutural do aparato fotossintético (HARTIKAINEN et al., 2000; PILON-SMITS et al., 2009).

Além disso, Hawrylak-Nowak (2008) e White (2016) relatam que concentrações moderadas de selênio podem estimular a síntese de pigmentos fotossintéticos e melhorar a eficiência fisiológica das plantas. Assim, os resultados obtidos indicam que a biofortificação com selênio favoreceu o acúmulo de clorofila B nos microverdes de lentilha, especialmente nas maiores doses de selenito, sem evidências de efeitos deletérios sobre os pigmentos fotossintéticos avaliados.

#### **4.4.3 Clorofila Total**

Para a clorofila total, também foi observada interação significativa entre as fontes de selênio e as doses aplicadas ( $p < 0,05$ ). Nos tratamentos com selenato de sódio, a dose de 5% apresentou o maior teor de clorofila total (163,74 mg/100 g), diferindo estatisticamente das doses de 10% (47,53 mg/100 g) e 20% (101,37 mg/100 g). Esse comportamento sugere que concentrações moderadas de selenato podem estimular a biossíntese de clorofilas, enquanto concentrações mais elevadas apresentam menor efeito sobre esse acúmulo.

Por outro lado, os tratamentos com selenito de sódio apresentaram aumento progressivo dos teores de clorofila total com o incremento das concentrações, sendo os maiores valores observados nas doses de 10% (159,65 mg/100 g) e 20% (208,81 mg/100 g). Na comparação entre as formas químicas dentro de cada dose, o selenito apresentou desempenho superior ao selenato nas maiores concentrações, evidenciando maior eficiência em promover o acúmulo de clorofilas.

A comparação com a testemunha pelo teste de Dunnett indicou que praticamente todos os tratamentos apresentaram valores superiores ao controle, exceto a dose de 10% de selenato, que não diferiu estatisticamente da testemunha. Esses resultados podem estar relacionados às diferenças nas rotas de absorção e assimilação das formas químicas de selênio pelas plantas. O selenato é absorvido principalmente pelos transportadores de sulfato e apresenta elevada mobilidade no sistema vascular vegetal, enquanto o selenito tende a ser rapidamente assimilado nos tecidos vegetais e incorporado a compostos orgânicos relacionados ao metabolismo do enxofre (LYONS et al., 2009; SCHIAVON; PILON-SMITS,

2017). Essas diferenças metabólicas podem influenciar diretamente a síntese e a estabilidade das clorofilas.

De modo geral, os resultados demonstram que a biofortificação com selênio promoveu aumento nos teores de clorofilas dos microverdes de lentilha, especialmente quando utilizado na forma de selenito em maiores concentrações. Além de favorecer o potencial fisiológico das plantas, o aumento desses pigmentos pode contribuir para a qualidade nutricional e funcional dos microverdes biofortificados.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que a biofortificação com selênio influenciou as características físico-químicas e o conteúdo de compostos bioativos em microverdes de lentilha (*Lens culinaris* Medik). De modo geral, observou-se que os microverdes apresentaram elevado teor de umidade, característica típica desse estágio de desenvolvimento vegetal, não sendo observadas alterações expressivas decorrentes da aplicação das diferentes formas de selênio.

Em relação ao teor de proteínas, verificou-se que os tratamentos com selênio, especialmente na forma de selenito de sódio, promoveram aumento significativo deste parâmetro em determinadas concentrações, indicando possível influência do elemento no metabolismo nitrogenado e na síntese de compostos proteicos.

A atividade antioxidante avaliada pelo método DPPH evidenciou que a suplementação com selênio contribuiu para o aumento da capacidade de sequestro de radicais livres nos microverdes, sugerindo estímulo à produção de compostos antioxidantes. Esse efeito reforça o potencial da biofortificação como estratégia para incrementar o valor funcional de alimentos de origem vegetal.

Quanto aos pigmentos fotossintéticos, observou-se que as diferentes formas e concentrações de selênio influenciaram os teores de clorofila A, clorofila B, clorofila total e carotenoides. De maneira geral, concentrações moderadas de selênio favoreceram o acúmulo desses pigmentos, enquanto concentrações mais elevadas apresentaram respostas diferenciadas entre as formas químicas avaliadas, com destaque para o selenito de sódio, que demonstrou maior estabilidade e eficiência em algumas condições.

Dessa forma, conclui-se que a biofortificação com selênio pode contribuir para melhorias na composição nutricional e no potencial antioxidante de microverdes de lentilha. Além disso, os resultados indicam que a forma química do selênio e a concentração aplicada desempenham papel importante na resposta fisiológica das plantas. Dentre os tratamentos

avaliados, o selenito na concentração de 20% destacou-se por promover maiores teores de  $\beta$ -caroteno, demonstrando potencial promissor para aplicação na produção de microverdes biofortificados.

No entanto, estudos adicionais ainda são necessários para aprofundar a compreensão dos mecanismos envolvidos e otimizar estratégias de biofortificação em microverdes. Estudos futuros podem investigar a biodisponibilidade do selênio nos microverdes biofortificados, bem como aspectos relacionados à estabilidade pós-colheita e estratégias para aumento da vida útil desses produtos.

## 6. REFERÊNCIAS

ALRIFAI, O. et al. LED-Induced Carotenoid Synthesis and Related Gene Expression in Brassica Microgreens. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021.

BELITZ, Hans-Dieter; GROSCH, Werner; SCHIEBERLE, Peter. **Food chemistry**. 4. ed. Berlin: Springer, 2019.

BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT – Food Science and Technology*, v. 28, n. 1, p. 25–30, 1995.

CALCIX. *Microgreens profitability: vertical farming business guide*. [S. l.], 2026. Disponível em:

<https://calcix.net/guides/business-startup/microgreens-profitability-vertical-farming-business-guide>. Acesso em: 16 maio 2026.

DAMODARAN, Srinivasan; PARKIN, Kirk L.; FENNEMA, Owen R. **Fennema's food chemistry**. 5. ed. Boca Raton: CRC Press, 2019.

DI BELLA, M. C. et al. Microgreens: nutritional properties, production, and applications. *Foods*, Basel, v. 10, n. 11, p. 2440, 2021.

DI GIOIA, Francesco et al. **Microgreens: novel fresh and functional food to explore all the value of biodiversity**. *Agronomy*, v. 7, n. 3, 2017.

FAO. *Food energy – methods of analysis and conversion factors*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2003.

HLAVINKA, Jan et al. The effects of selenium on photosynthesis and oxidative stress in *Arabidopsis thaliana*. *BMC Plant Biology*, London, v. 9, p. 58, 2009. DOI: 10.1186/1471-2229-9-58.

HARTIKAINEN, Heli; XUE, Taina; PIIRONEN, Vesa. **Selenium as an antioxidant and pro-oxidant in ryegrass**. *Plant and Soil*, v. 225, p. 193–200, 2000.

HASANUZZAMAN, Mirza et al. Selenium toxicity in plants and environment: biogeochemistry and remediation possibilities. *Plants*, Basel, v. 9, n. 12, p. 1711, 2020. DOI: 10.3390/plants9121711.

HATFIELD, Dolph L. et al. **Selenium: its molecular biology and role in human health**. 3. ed. New York: Springer, 2014.

HAWRYLAK-NOWAK, Barbara. **Effect of selenium on selected macronutrients in maize plants**. *Journal of Elementology*, v. 13, n. 4, p. 513–519, 2008.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

KOWITCHAROEN, Laddawan et al. Bioactive composition and nutritional profile of microgreens cultivated in Thailand. *Applied Sciences*, Basel, v. 11, n. 17, p. 7981, 2021. DOI: 10.3390/app11177981

KYRIACOU, M. C. et al. Microgreens as a component of space life support systems: A cornucopia of functional food. *Frontiers in Plant Science*, v. 7, p. 1–13, 2016.

LARA, T. S. Biofortificação agrônômica com selênio e alterações metabólicas em trigo. 2016. 119 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fisiologia Vegetal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

LI, H. et al. Effects of selenium on the growth and antioxidant capacity of rice. *Journal of Agricultural Science*, v. 10, n. 5, p. 16–24, 2018.

LICHTENTHALER, Hartmut K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, San Diego, v. 148, p. 350–382, 1987.

LYONS, Graham H.; STANGOULIS, James; GRAHAM, Robin D. **High-selenium wheat: biofortification for better health**. *Nutrition Research Reviews*, v. 16, n. 1, p. 45–60, 2009.

MERRILL, A. L.; WATT, B. K. *Energy value of foods: basis and derivation*. Washington: USDA, 1973.

MIR, S. A. et al. Microgreens: Production, shelf life, and bioactive components. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 57, n. 12, p. 2730–2736, 2017.

PENELLO, G. et al. Nutritional and functional properties of microgreens: an overview. *Trends in Food Science & Technology*, London, v. 106, p. 25-36, 2020.

PILON-SMITS, Elizabeth A. H. et al. **Selenium in plants**. In: HELL, Rüdiger; MENDEL, Ralf-Rainer. *Cell biology of metals and nutrients*. Berlin: Springer, 2009. p. 225–241.

PISOSCHI, Aurelia Magdalena; POP, Aneta. **The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: a review**. *European Journal of Medicinal Chemistry*, v. 97, p. 55–74, 2015.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2020.

RAYMAN, Margaret P. **Selenium and human health**. *The Lancet*, v. 379, n. 9822, p. 1256–1268, 2012.

RAWAL, Vijay et al. Lentil: an ancient crop for modern times. *Journal of Food Legumes*, Kanpur, v. 32, n. 2, p. 65–72, 2019.

SCHIAVON, Michela; PILON-SMITS, Elizabeth A. H. **The fascinating facets of plant selenium accumulation – biochemistry, physiology, evolution and ecology**. *New Phytologist*, Cambridge, v. 213, n. 4, p. 1582–1596, 2017.

SEBRAE. *Produção de microverdes representa oportunidade para pequenos produtores*. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://sebrae.com.br>. Acesso em: 16 maio 2026.

SORS, Tobias G.; ELLIS, Daniel R.; SALT, David E. **Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants**. *Photosynthesis Research*, v. 86, p. 373–389, 2005.

THAVARAJAH, Dil; THAVARAJAH, Pushparajah; VIAL, Eric; GEBHARDT, Mary; LACHER, Craig; KUMAR, Shiv; COMBS, Gerald F. Jr. Will selenium increase lentil (*Lens culinaris* Medik) yield and seed quality? *Frontiers in Plant Science*, v. 6, art. 356, 2015. DOI: 10.3389/fpls.2015.00356

THAVARAJAH, D.; THAVARAJAH, P.; SUTTLE, R.; JAIN, A. Lentils (*Lens culinaris* Medikus subsp. *culinaris*): a whole food for increased iron and zinc intake. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 59, n. 24, p. 11124–11128, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf2023907>.

WHANGER, P. D. Selenium in the treatment of heavy metal poisoning and chemical carcinogenesis. *Journal of Trace Elements in Experimental Medicine*, v. 15, n. 2-3, p. 117–129, 2002.

WHITE, Philip J. **Selenium accumulation by plants.** *Annals of Botany*, v. 117, n. 2, p. 217–235, 2016.

WHITE, Philip J.; BROADLEY, Martin R. **Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets.** *New Phytologist*, v. 182, n. 1, p. 49–84, 2009.

XIAO, Xiaoying et al. **Assessment of vitamin and carotenoid concentrations of emerging food products: edible microgreens.** *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 60, n. 31, p. 7644–7651, 2012.

ZOIDIS, Efstathios et al. **Selenium-dependent antioxidant enzymes: actions and properties of selenoproteins.** *Antioxidants*, v. 7, n. 5, 2018.

ZHANG, L. et al. Selenium speciation and distribution within Se-enriched rice grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, v. 51, n. 22, p. 6460–6467, 2003.