

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA CEBOLA COM
SELÊNIO E ASPECTOS PRODUTIVOS**

Beliza Queiroz Vieira Machado
Engenheira Agrônoma

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA CEBOLA COM
SELÊNIO E ASPECTOS PRODUTIVOS**

Discente: Beliza Queiroz Vieira Machado

Orientador: Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho

Coorientador: Prof. Dr. André Rodrigues dos Reis

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

M149b Machado, Beliza Queiroz Vieira
Biofortificação agrônômica da cebola com selênio e aspectos
produtivos / Beliza Queiroz Vieira Machado. -- Jaboticabal,
2022
48 f. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Arthur Bernardes Cecílio Filho
Coorientador: André Rodrigues dos Reis

1. Biofortificação. 2. Nutrição mineral. 3. Selênio. 4. Cebola.
5. Produtividade. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo
autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA CEBOLA COM SELÊNIO E ASPECTOS PRODUTIVOS

AUTORA: BELIZA QUEIROZ VIEIRA MACHADO

ORIENTADOR: ARTHUR BERNARDES CECILIO FILHO

COORIENTADOR: ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ARTHUR BERNARDES CECILIO FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal

Prof. Dr. FERNANDO GIANINETTI DE MACEDO (Participação Virtual)
Instituto Federal do Mato Grosso do Sul-IFMS / Naviraí/MS

Dr. HILÁRIO JÚNIOR DE ALMEIDA (Participação Virtual)
Agrônomo Autônomo Jaboticabal/SP

Prof. Dr. LEILSON COSTA GRANGEIRO (Participação Virtual)
Universidade Federal Rural do Semiárido-UFERSA / Mossoró/RN

Profa. Dra. MARIA LIGIA DE SOUZA SILVA (Participação Virtual)
Universidade Federal de Lavras-UFLA / Lavras/MG

Jaboticabal, 04 de abril de 2022

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

BELIZA QUEIROZ VIEIRA MACHADO – A autora nasceu em Belo Horizonte, estado de Minas Gerais, em 08 de abril de 1990. Em 2009 ingressou no curso de Agronomia, na Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Durante a graduação foi bolsista de Iniciação científica pelo CNPq (2010-2011) e FAPEMIG (2011-2012), desenvolvendo pesquisa na área de melhoramento genético da cultura da soja. Foi estagiária do Programa melhoramento de Soja da UFU, atuando na área de implantação, condução e avaliação de experimentos. Também foi monitora da disciplina Cultura do Algodoeiro e da Soja por três semestres. Em julho de 2014 obteve o título de Engenheira Agrônoma pela Universidade Federal de Uberlândia. Em 2015 iniciou o curso de Mestrado em Agronomia pela mesma universidade, concluindo em janeiro de 2017. Em agosto de 2018 ingressou no curso de doutorado em Agronomia (Produção Vegetal), na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - *Campus* de Jaboticabal.

*“Crê em ti mesmo, age e verá os resultados.
Quando te esforças, a vida também se esforça
para te ajudar”*

Chico Xavier

Aos meus pais, Sandra e Eduardo.

Ao meu noivo, Gabriel.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me concedido força e perseverança nos momentos em que achei que não daria conta e pensei em desistir.

Aos meus pais Sandra e Eduardo, por todo amor, carinho, apoio e dedicação na minha formação pessoal e profissional. Por nunca questionarem minhas escolhas e sempre acreditarem que eu seria capaz. Por me darem o alicerce para me tornar quem me tornei.

Ao meu noivo, amigo e companheiro, pela parceria durante todos esses anos juntos. Pela dedicação a mim e ao meu experimento. Por continuar ao meu lado mesmo nos momentos de crises e incertezas me amparando e fazendo acreditar que tudo daria certo.

Ao professor Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho, por ter me aceitado como orientada e confiado na minha capacidade. Pelo suporte e tempo dedicado para a realização do trabalho, além da paciência e sabedoria para orientar e transmitir os conhecimentos. Por compreender cada momento de fraqueza e por estar sempre disponível quando precisei. Obrigada por tornar a caminhada do doutorado mais leve e tranquila.

Ao professor Dr. André Rodrigues dos Reis, pela coorientação e auxílio nas realizações das análises.

Ao meu amigo Breno pela paciência e colaboração durante esses anos de doutorado, deixando o trabalho mais divertido e tranquilo, pela colaboração em todas as etapas do experimento e pelas constantes revisões. Sem ele, os resultados e essa tese não seriam possíveis.

Aos colegas de pós-graduação Camila, Carolina, Paulo Henrique, Danilo, Maria, Isaias e Julia pela companhia nos dias de atividade de horta e por me receberam de braços abertos no grupo, o que tornou o caminho mais prazeroso.

Aos funcionários do Setor de Olericultura e Plantas Aromático-Medicinais, Srs. Inauro Santana de Lima e Reinaldo Aparecido dos Santos pelo auxílio na condução do experimento, sem os quais não seria possível a realização dos trabalhos.

À minha amiga Tassiana que, apesar da distância, sempre esteve disponível para ouvir minhas lamentações mesmo quando ela mesma estava atolada em problemas, nunca deixou de me ouvir e me apoiar em cada decisão tomada.

À FCAV/UNESP e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, pela oportunidade na realização do doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão das bolsas de estudo que possibilitaram a realização da pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da FCAV/UNESP, pelos conhecimentos transmitidos.

Muito obrigada!!!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	ii
ABSTRACT	iii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Selênio	3
2.1.1 Selênio na saúde humana.....	4
2.1.2 Selênio nas plantas	6
2.2 Biofortificação agronômica com selênio	9
2.3 Cebola.....	11
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	13
3.1 Localização e caracterização da área experimental	13
3.2 Tratamentos e desenho experimental.....	13
3.3 Instalação e condução do experimento.....	14
3.4 Variáveis analisadas	15
3.5 Análise estatística	16
4 RESULTADOS	17
5 DISCUSSÃO	20
6 CONCLUSÕES	25
7 REFERÊNCIAS.....	27

BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA CEBOLA COM SELÊNIO E ASPECTOS PRODUTIVOS

RESUMO – A ingestão de selênio (Se), por grande parte da população mundial, ocorre abaixo do recomendado pelos órgãos de saúde. A biofortificação agronômica da cebola é uma estratégia para aumentar a ingestão diária de Se, pois é um alimento frequentemente consumido e amplamente utilizado na indústria alimentícia. Além disso, a fertilização de culturas com Se é uma estratégia para melhorar o desenvolvimento e a aumentar produtividade da cultura, uma vez que o elemento é capaz de promover benefícios à planta. O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito de doses e formas de aplicação de Se na biofortificação e na produtividade da cultura da cebola. Neste estudo, foram avaliadas aplicações via solo e foliar de doses de Se (0, 10, 25, 50, 100 e 200 g ha⁻¹) aplicados na fonte selenato de sódio. A qualidade nutricional (macro e micronutrientes) do bulbo não foi afetada pela biofortificação, assim como a pungência. O aumento da dose de Se aplicado aumentou o teor de Se no bulbo. A altura, o número de folhas e o diâmetro do pseudocaule de cebola não foram influenciados pela fertilização com Se, mas, foi observado aumento de 14,7 % na produtividade quando o Se foi aplicado na dose de 99 g ha⁻¹. A aplicação foliar foi mais eficiente na biofortificação do bulbo. Portanto, a fertilização com Se possibilitou a biofortificação da cebola, sem comprometer suas características nutricionais, além de proporcionar incrementos na produtividade.

Palavras-chave: *Allium cepa*, elemento benéfico, fome oculta, produtividade

AGRONOMIC BIOFORTIFICATION OF ONION WITH SELENIUM AND PRODUCTIVE ASPECTS

ABSTRACT – The selenium (Se) intake of a large part of the world population is below that recommended by health agencies. The agronomic biofortification of onions is a strategy to increase the daily intake of Se, since it is a food frequently consumed by the population and widely used in the food industry. In addition, fertilization of crops with Se is a strategy to increase crop development and yield, since this element is able to promote benefits to the plant. The objective of this study was to evaluate the effect of doses and forms of Se supply on onion biofortification and crop yield. In this investigation, foliar and soil applications of Se doses (0, 10, 25, 50, 100 and 200 g ha⁻¹) were evaluated. Bulb nutrient quality (macro- and micronutrients) was not affected by biofortification, as well as pungency. Increasing the applied Se dose increased the Se content of the bulb. Height, number of leaves, and pseudostem diameter of onion were not influenced by Se fertilization, but a 14.7% increase in yield was observed when Se was applied at a rate of 99 g ha⁻¹. Foliar application was more efficient in biofortification of bulbs. Therefore, Se fertilization allowed onion biofortification without compromising its nutritional characteristics, besides providing yield increases

Keywords: *Allium cepa*, beneficial element, hidden hunger, yield

1 INTRODUÇÃO

O selênio (Se) é um elemento essencial para humanos e animais, pois participa ativamente do metabolismo sob a forma de selenoproteínas (Rayman, 2012) e protege o organismo de radicais livres e danos oxidativos (Das et al., 2018). Além disso, desempenha atividades anti-inflamatórias, participa da síntese de hormônio e da prevenção de diversas doenças. Porém, estima-se que 15% da população mundial apresenta deficiência desse nutriente no organismo (Hawrylak-Nowak, 2013; Malagoli et al., 2015; Reis et al., 2017).

A principal forma de obtenção de Se pelos humanos é pela alimentação, sendo as principais fontes desse nutriente a castanha-do-pará, algumas espécies de peixes, frutos do mar, carnes bovinas e alguns vegetais (Das et al., 2018; Pyrzynska e Sentkowska, 2020; Lanza e Reis, 2021). No entanto, o teor de Se nos alimentos, principalmente nos vegetais, é influenciado pela concentração desse elemento no solo. Algumas regiões apresentam baixo teor de Se, refletindo no baixo teor desse elemento nos alimentos (Pyrzynska e Sentkowska, 2020; Tavanti et al., 2021; Lanza e Reis, 2021), o que pode causar problemas de saúde, como baixa imunidade, retardo de crescimento, metabolismo ósseo prejudicado e função anormal da tireoide (Kieliszek; Bano; Zare, 2022).

Dessa forma, o fornecimento do Se às plantas por meio da biofortificação agrônômica é uma alternativa eficiente, de baixo custo e sustentável para contornar o problema de deficiência do elemento, principalmente em populações de baixa renda (Bouis e Saltzman, 2017). Essa estratégia tem sido utilizada na Finlândia desde 1985, quando o Se foi adicionado ao fertilizante NPK, aumentando o conteúdo do elemento em cereais em 15 vezes e, conseqüentemente, dobrando a concentração de Se no sangue da população (Aro et al., 1995; Alfthan et al., 2015). Esse resultado demonstra que aumentar o teor de Se por meio da fertilização pode ser utilizada para o enriquecimento de diversos produtos vegetais, visando reduzir os problemas de desnutrição causados pela falta do nutriente (D'Amato et al., 2020; Hasanuzzaman et al., 2020; Mateus et al., 2021).

A resposta de espécies vegetais à fertilização com Se é variada, sendo que dentre as que se beneficiam pela sua presença e apresentam capacidade de

acumulá-lo em seus tecidos, a cebola (*Allium cepa*) se destaca. Essa hortaliça é classificada como acumuladora secundária de Se, pois tem a capacidade de acumular em seus tecidos até 1 g kg⁻¹ de Se (Pyrzynska e Sentkowska, 2020), sendo indicada para estudos de biofortificação pela capacidade de armazenamento em suas estruturas e disponibilização para o próximo nível trófico.

A cebola é uma das principais hortaliças condimentares consumidas no mundo, principalmente pelas suas variadas formas de consumo, seja *in natura*, seja processada na forma de tempero. É ainda considerada um alimento nutracêutico pois, além de atender às necessidades diárias de vitaminas e minerais, também possui substâncias que ajudam na prevenção de doenças (Rodrigues et al., 2020).

O Brasil ocupa o 13º lugar no ranking mundial de produção de cebola, sendo sua produtividade média de aproximadamente 31,5 t ha⁻¹ (IBGE, 2021), podendo chegar a patamares próximos a 100 t ha⁻¹ em áreas com maior nível de tecnológico. A busca por aumento na eficiência produtiva é constante. Dentre as estratégias para esse fim está a fertilização de plantas com elementos benéficos, os quais são capazes de estimular o desenvolvimento das plantas, aumentar a resistência a pragas e doenças e/ou favorecer a absorção de outros nutrientes. Em concentrações adequadas nos tecidos vegetais, o Se tem efeito positivo no crescimento, desenvolvimento e produtividade de plantas de diversas espécies por conferir à planta maior tolerância às condições desfavoráveis de crescimento, como estresse hídrico, altas temperaturas e ambientes salinos (Puccinelli et al., 2017; Schiavon et al. 2017; Andrade et al., 2018; Malerba e Cerana, 2018; Hawrylak-Nowak et al., 2018; Silva et al., 2021). Entretanto, para obter os efeitos positivos do Se é necessário determinar a dose e a forma de aplicação mais adequados para cada espécie, de forma a obter incrementos dos teores do elemento na planta e maximizar a produção.

Efeitos positivos do Se na biofortificação e na produtividade de plantas de cebola já foram comprovados em condições controladas de cultivo no hemisfério norte (Sharma et al., 2007; Pöldma et al., 2013; Bybordi et al., 2018). Sharma et al. (2007) verificaram 1172 µg g⁻¹ de Se na massa seca do bulbo ao aplicarem 5 mg L⁻¹ de selenato de sódio. Pöldma et al. (2013) relataram aumento de 350% no teor de Se em bulbos com a aplicação de 50 g ha⁻¹ de selenato de sódio. Esses mesmos

autores verificaram incrementos de 16% na produtividade de bulbos ao aplicarem 25 g ha⁻¹ de Se. A aplicação de 1 kg ha⁻¹ de Se possibilitou aumento de 52% na produtividade dos bulbos, de acordo com Bybordi et al. (2018).

Embora demonstrem a resposta de plantas de cebola à aplicação de Se, esses trabalhos foram realizados sob condições edafoclimáticas distintas das regiões brasileiras produtoras de cebola, fato que influencia o metabolismo vegetal e pode interferir na dose ótima, bem como na melhor forma de aplicação. Portanto, visando avaliar a capacidade de biofortificação de cebola e o efeito no crescimento e produtividade da planta, o objetivo do estudo foi avaliar o efeito de doses de selênio e do modo de fornecimento na cebola.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Selênio

O Se por apresentar características químicas intermediárias entre os metais e não-metais, é classificado como um semimetal (Chauhan et al., 2019). Na natureza, é encontrado em vários estados de oxidação, sendo os estados de valência mais comuns -2, 0, +2, +4 e +6 (Tinggi, 2003). Na forma inorgânica, é encontrado no estado elementar (Se⁰), na forma de selenetos (Se²⁻), selenatos (SeO₄²⁻) ou selenitos (SeO₃²⁻), sendo as últimas formas utilizadas agronomicamente (selenito ou selenato de sódio) na fertilização de culturas. Na forma orgânica, é encontrado como metilselenídeos voláteis, íons trimetilselenônio e aminoácidos contendo selênio (Yang et al., 2022).

O selenato é a espécie dominante de Se em solos alcalinos e bem aerados, sendo móvel e facilmente lixiviado (Li et al., 2008). O selenito, por sua vez, tem alta afinidade com óxidos/hidróxidos de Fe e Al, argila e matéria orgânica, resultando em menor biodisponibilidade do elemento quando essas fases são abundantes no solo (Yang et al., 2022). Portanto, no solo, a mobilidade e a disponibilidade do Se são influenciadas pela especiação do elemento, a qual é controlada principalmente pelas condições de pH e do potencial redox do solo (Yang et al., 2022).

A concentração de Se no solo difere muito entre e até mesmo dentro de países (Kushwaha et al., 2021), devido às variações geográficas (rochas e atividades

vulcânicas), climáticas (pluviosidade e aridez), bem como à textura do solo e parâmetros químicos como pH, conteúdo orgânico do solo e potencial redox (Winkel et al., 2015).

O conteúdo global de Se no solo normalmente varia de 0,01 a 2,00 mg kg⁻¹, com média de 0,40 mg kg⁻¹. No entanto, pode chegar a 1200 mg kg⁻¹ em regiões seleníferas, onde a geologia, o clima e os parâmetros físico-químicos do solo favorecem a deposição e acumulação desse elemento (Fordyce, 2013; Ekumah et al., 2021), como os solos da região amazônica no Brasil, algumas províncias na China e algumas planícies no Canadá (Ekumah et al., 2021).

No Brasil, devido à grande extensão territorial e à ampla biodiversidade, a concentração de Se no solo é variável (Reis et al., 2017), sendo os maiores valores observados na região amazônica (Moreda-Piñeiro et al., 2018). Já nas regiões Sudeste e Centro-Sul, a concentração desse elemento varia de menos de 0,089 a 1,61 mg kg⁻¹, com média de 0,191 mg kg⁻¹ (Ekumah et al., 2021).

2.1.1 Selênio na saúde humana

O Se é considerado um elemento traço essencial para a saúde humana e animal, pois faz parte da constituição de proteínas que participam ativamente do metabolismo humano (Kieliszek, 2019). A sua função nutricional é exercida, principalmente, por selenoenzimas e selenoproteínas, como a glutathione peroxidase, a tioredoxina redutase e a iodotironina 5`deiodinase, que estão envolvidas na proteção antioxidante e na regulação metabólica e hormonal. Assim, em quantidades adequadas no organismo humano, o Se apresenta efeito anti-inflamatório, protetor do sistema cardíaco e anticancerígeno (Kieliszek; Bano; Zare, 2022), entre outros benefícios.

Por outro lado, a deficiência de Se está relacionada com a redução da imunidade, intensificação de depressão e ansiedade, além de afetar o funcionamento do sistema nervoso e interferir no desenvolvimento do embrião em gestantes (Kieliszek, 2019). Além disso, pode aumentar o risco de doenças cardiovasculares, cânceres, doenças hepáticas e artropatias (Ferreira et al., 2020).

Em casos de deficiência severa (ingestão de Se $<10 \mu\text{g dia}^{-1}$), relata-se a ocorrência da doença de Keshan, uma cardiomiopatia endêmica, com incidência em crianças e mulheres na idade fértil. A deficiência de Se no organismo humano ainda estimula o desenvolvimento de um vírus que, nessas condições, desenvolve a doença de Kashin-Beck, definida como osteoartropatia, caracterizada por degeneração da cartilagem nas articulações (Kieliszek, 2019; Yang et al., 2021).

Outro aspecto relacionado ao benefício do Se ao organismo humano é a relação desse nutriente com infecções virais, inclusive de Covid-19 (SARS-CoV-2). Vários estudos avaliaram a relação entre o conteúdo de Se corporal e a incidência, gravidade e mortalidade pelo Covid-19. Esses estudos demonstraram que pacientes com sintomas mais graves da doença apresentavam concentração de Se no sangue menor em comparação a pacientes com sintomas leves a moderados (Fakhrolmobasheri et al., 2021). Em caso de infecções virais, a formação de espécies reativas de oxigênio no organismo humano aumenta, levando a maior estresse oxidativo.

A glutathione peroxidase (GPX) é uma selenoproteína com propriedades antioxidantes e antivirais (Seale et al., 2020), que auxilia no combate das espécies reativas de oxigênio no organismo. Sendo assim, para a otimização da atividade da enzima GPX é recomendado concentrações de no mínimo $100 \mu\text{g L}^{-1}$ (Rayman, 2002), sendo que concentração sérica de Se menor que $85 \mu\text{g L}^{-1}$ é considerada deficiência do nutriente. Portanto, a deficiência severa de Se pode ser considerada um fator de gravidade, mortalidade e risco geral de Covid-19 (Younesian et al., 2021), uma vez que a sua deficiência pode reduzir a resposta imune e causar a progressão da doença. Assim, manter concentrações de Se no organismo dentro do limite recomendado é importante para a manutenção da imunidade.

A disponibilização do Se aos humanos ocorre via alimentação (Das et al., 2018; Pyrzynska e Sentkowska, 2020). Entretanto, a concentração de Se nos alimentos reflete fortemente as condições em que foram produzidos, variando de acordo com a localização geográfica (Pyrzynska e Sentkowska, 2020), uma vez que a concentração desse elemento no solo é variável.

As concentrações de Se que o caracterizam como benéfico ou tóxico para humanos são muito próximas, sendo considerada uma peculiaridade do elemento

(Rayman, 2020; Schiavon et al., 2020). As agências regulamentadoras apresentam divergências quanto aos limites recomendados para o seu consumo, não havendo consenso sobre a quantidade recomendada de ingestão diária de Se, que varia segundo o sexo, a idade e até mesmo o país. No Brasil, a recomendação para a ingestão de Se em adultos é de $55 \mu\text{g dia}^{-1}$ (Reis et al., 2018). Quando consumido em quantidades superiores a $400 \mu\text{g dia}^{-1}$, causa toxicidade em humanos (Fordyce, 2013; Vinceti et al., 2018).

A selenose, caracterizada pelo excesso de Se, pode causar fadiga, taquicardia, náusea e diarreia (Ferreira et al., 2020). Ainda, pode ocasionar danos aos rins e ao fígado, necrose do coração, lesões na pele, perda de cabelo e unha, descoloração e perda dos dentes (Kieliszek, 2019). Além disso, a selenose crônica caracterizada por elevadas concentrações de Se no sangue por longos períodos está relacionada com o aumento do risco do desenvolvimento de diabetes tipo 2 e de câncer de próstata, além de causar necrose hepática e renal, distúrbios neurológicos, comprometendo os sistemas reprodutivo e imunológico (Kieliszek, 2019; Kieliszek; Bano; Zare, 2022).

2.1.2 Selênio nas plantas

A essencialidade do Se para as plantas ainda não foi comprovada (Saha et al., 2017) e, portanto, alguns autores o classificam como elemento benéfico (Faria e Karp, 2015; Hasanuzzaman et al., 2020). O Se desempenha papel importante nas reações antioxidantes e no equilíbrio hormonal das células vegetais, incluindo o aumento da atividade da enzima glutathione peroxidase, responsável por eliminar as espécies reativas de oxigênio e peróxidos lipídicos, consequentemente, melhorando a resistência destas ao estresse abiótico e ao envelhecimento (Andrade et al., 2018; Silva et al., 2018).

A tolerância ao estresse abiótico conferida pelo Se foi observada por Hawrylak-Nowak et al. (2018), que constataram que a aplicação de selenato de sódio ($50 \text{ mg de Se dm}^{-3}$) em *Valerianella locusta* atenuou os distúrbios induzidos por altas temperaturas no crescimento e no metabolismo das plantas, ou seja,

aumentou a termotolerância das plantas por meio da ação cooperativa de enzimas antioxidantes na remoção do excesso de peróxido de hidrogênio.

A aplicação de Se também atenua os danos causados por estresse hídrico, conforme observado por Rady et al. (2020), que concluíram que a aplicação de Se proporcionou maior crescimento e produção de tomateiros em condição de estresse hídrico. Os autores explicam que plantas tratadas com o elemento apresentam membrana e quantidade de água da célula íntegros sob estresse hídrico. Assim, os efeitos positivos decorrentes da fertilização com Se contribuem para o aumento da concentração e da atividade dos osmoprotetores e antioxidantes, que compõem o sistema de defesa, reduzindo as quantidades de biomarcadores de estresse oxidativo. Em consequência, ocorrem melhorias das características de crescimento, eficiência fotossintética, produtividade e qualidade dos frutos.

Porém, os efeitos benéficos do Se não são dependentes do estresse das plantas, sendo observados também naquelas que apresentam condições adequadas de cultivo, como constatado por Silva et al. (2020) e Lanza e Reis (2021). Lanza e Reis (2021), ao aplicarem 50 g ha^{-1} de Se, observaram que plantas de feijão-caupi apresentaram aumento da quantidade de pigmentos fotossintéticos, fotossíntese e produtividade. Ainda, a aplicação do nutriente aumentou a atividade das enzimas superóxido desmutase, catalase e ascorbato peroxidase, reduzindo a formação de espécies reativas de oxigênio na célula vegetal. De forma semelhante, Lara et al. (2019) observaram que a aplicação de 21 g ha^{-1} de Se promoveu aumento na taxa fotossintética de plantas de trigo, influenciando positivamente o metabolismo de carboidratos e resultando em maior produtividade de grãos.

Apesar dos benefícios proporcionados pelo Se às plantas, a interação deste elemento com os demais nutrientes pode causar desequilíbrio nutricional, levando à redução do crescimento (Ferreira et al., 2020). As relações podem ser caracterizadas como antagônicas ou sinérgicas, dependendo do nutriente envolvido no processo fisiológico (Hawrylak-Nowak et al., 2015), da espécie vegetal, bem como da forma de Se aplicado (Rios et al., 2013).

O principal elemento estudado em relação à interação com o Se é o S, devido à semelhança química que possuem. Em doses baixas de Se ($40 \text{ }\mu\text{M}$ de selenato), o S apresenta comportamento sinérgico, tendo sua concentração aumentada em 3,8

vezes em folhas de alface (Rios et al., 2013). Ferreira et al. (2020) observaram aumentos de 29%, 24% e 23% na concentração de S quando aplicado 2, 4 e 6 μM de selenato. Essa resposta positiva pode ser explicada pela expressão de genes relacionados a transportadores de sulfato de alta afinidade, sobretudo SULTR1, em decorrência do aumento dos teores de Se, o que aumenta a absorção de sulfato e selenato nas plantas (Terry et al. 2000; Feng et al., 2013). No entanto, de acordo com Rios et al. (2013), quando o Se é aplicado em maiores doses (superiores a 40 μM), a concentração foliar de S reduz, sugerindo comportamento antagônico entre os elementos em maiores concentrações de Se.

A maior disponibilidade de Se faz com que o elemento substitua o S em aminoácidos como cisteína e metionina, alterando a estrutura de proteínas (Rios et al. 2013; Silva et al., 2018). Isso, somado ao distúrbio nutricional, estresse oxidativo e danos ao aparelho fotossintético, induzidos por concentrações tóxicas de Se, causam efeitos negativos nas trocas gasosas e crescimento de plantas não acumuladoras desse elemento (Ferreira et al., 2020). Dessa forma, os sintomas de toxicidade por Se são caracterizados por danos à membrana, clorose e morte celular (Lanza e Reis, 2021). Os efeitos da toxicidade de plantas por Se também podem ser observados no tamanho da planta causando redução de produtividade.

A influência da aplicação de Se na concentração de nitrogênio (N) nas plantas foi constatada por Ilbas et al. (2012), os quais observaram que a aplicação de selenito de sódio em baixa concentração (12,5 g ha^{-1} de Se) aumentou a concentração de N nos grãos de cevada. No entanto, nas maiores doses (18,75 g ha^{-1} e 25 g ha^{-1}), o Se correlacionou-se negativamente com a assimilação de N. Rios et al. (2013) observaram que a aplicação de 120 μM de Se, como selenato de sódio, reduziu a concentração foliar de N em alface em 25%. A aplicação de 60 μM de Se, na forma de selenato de sódio, em plantas de alface, reduziram em 22% e 64% as concentrações foliares de Ca e Mg, respectivamente (Rios et al., 2013). Por outro lado, Łukaszewicz et al. (2019) observaram aumento nas concentrações de K e Ca em 71% e 18%, respectivamente, em brotos de ervilhas tratadas com 20 $\mu\text{mol dm}^{-3}$ de selenato de sódio.

Łukaszewicz et al. (2019) explicam que a exposição de plantas a concentrações tóxicas de Se resulta na desidratação do tecido vegetal. Os autores

explicam que, uma vez que o K é um elemento importante para a regulação osmótica das plantas e atua para a recuperação da turgescência celular, a desidratação causada pelo Se tende a exigir elevada absorção e translocação de K às folhas, visando manter o potencial osmótico dessa região. Portanto, concluíram que a toxicidade causada pelo Se afeta diretamente na maior absorção de K pelas plantas.

O aumento da concentração de Ca nas plantas em função de doses elevadas de Se ocorre pela resposta das plantas à toxicidade. As plantas possuem sistema de sinalização de longa distância, que transmitem a outros tecidos ou órgãos os estresses sofridos localmente, causando aclimatação sistêmica adquirida. Uma vez que o Ca é um dos sinalizadores sistêmicos que atuam direto no xilema, frente à toxicidade causada pelo Se, a absorção do elemento é aumentada (Choi et al., 2016).

Portanto, o estudo das relações do Se com outros nutrientes é fundamental em pesquisas envolvendo biofortificação com esse elemento, uma vez que a presença do Se nos tecidos das plantas pode causar desequilíbrios nutricionais, influenciando no metabolismo e desenvolvimento das plantas, bem como alterar a composição nutricional do alimento.

2.2 Biofortificação agronômica com selênio

Apesar de não haver dados oficiais sobre a deficiência de Se na população brasileira, existem evidências de sua insuficiência em várias regiões do país (Ferreira et al., 2002; Maihara et al., 2004). No mundo, estima-se que 15% da população encontra-se deficiente em Se (White e Broadley, 2009; Hawrylak-Nowak, 2013).

Nesse sentido, as plantas desempenham um papel fundamental na bioacumulação de Se ao longo das cadeias alimentares, visto que a principal forma de ingestão desse nutriente por humanos é por meio da alimentação (Pyrzynska e Sentkowska, 2020). Entretanto, a baixa concentração de Se na maioria dos solos agricultáveis brasileiros (Reis et al., 2014; Gabos et al., 2014; Pyrzynska e Sentkowska, 2020) reflete na baixa concentração de Se no alimento e, consequentemente, na baixa ingestão desse nutriente pela população,

principalmente, em pessoas com baixo poder aquisitivo, que não possuem uma alimentação diversificada.

Frente a esse cenário e buscando reduzir a deficiência de Se na população, a biofortificação tem sido foco de pesquisas. Esta consiste em aumentar a concentração de vitaminas e sais minerais em partes alimentícias de plantas por meio do melhoramento genético convencional, engenharia genética ou práticas agrônomicas (Bouis e Saltzman, 2017; Das et al., 2018). Na biofortificação agrônômica, o método majoritariamente empregado é o de adubação dos cultivos de forma a elevar o teor do nutriente-alvo (Lindon et al., 2018; Buturi et al., 2021), sem que haja perda de produção ou danos às plantas (Silva et al., 2020). O sucesso da biofortificação depende da espécie vegetal, da forma de disponibilização do Se para a planta (via solo ou pulverização foliar), da fonte utilizada e época de aplicação do Se (Schiavon et al., 2020; Hossain et al., 2021).

Algumas plantas, quando cultivadas em solos na presença de Se, têm a capacidade de acumulá-lo (Yadav et al., 2007), como brócolis, alho e cebola (Pyrzynska e Sentkowska, 2020), sem prejudicar o desenvolvimento e produtividade da cultura. Assim, uma alternativa para minimizar os problemas da deficiência do elemento na dieta humana, é a fertilização dos cultivos de produtos básicos da alimentação.

A aplicação de uma das formas de Se, o selenato de sódio, apresentou eficiência na biofortificação de feijoeiro ao ser aplicado na dose de 50 g ha^{-1} , em que foi possível observar a concentração de $0,19 \text{ mg kg}^{-1}$ de Se nos grãos, valor esse dentro do limite recomendado para suprir a necessidade do nutriente pela população brasileira (Corbo et al., 2018). Também, foi possível observar que o fornecimento de 25 g ha^{-1} de selenato de sódio proporcionou o acúmulo de $0,29 \text{ mg kg}^{-1}$ de Se em grãos de arroz, valor que, considerando o consumo diário de arroz pela população, representa o consumo equivalente a 45% da necessidade diária de Se (Reis et al., 2018).

Ao se adicionar 1 mg L^{-1} de Se na solução nutritiva em sistema hidropônico, foi possível obter $58 \text{ } \mu\text{g Se}$ em 100 g de tomate (Pezzarossa et al., 2014). O uso de Se em sistema hidropônico também foi realizado para a cultura da alface, em que $15 \text{ } \mu\text{M}$ de selenato e selenito de sódio proporcionaram crescimento adequado das

planta, sem apresentar indicativos de toxicidade, sendo essa dose indicada para o uso na biofortificação da cultura (Hawrylak-Nowak, 2013).

A cebola apresenta potencial para biofortificação, uma vez que é considerada uma cultura acumuladora de Se (Pérez et al., 2019; Pyrzynska e Sentkowska 2020). Culturas acumuladoras de Se têm a capacidade de converter selenocisteína (SeCys) e selenometionina (SeMet) em metabólitos de Se não tóxicos, como a metilselenocisteína (metil-SeCys), que não provoca estresse oxidativo e não é incorporada às proteínas, podendo ser acumuladas com segurança (Winkel et al., 2015), ou voláteis, como dimetildiseleneto (DMDSe), o qual é volatilizado pela planta, sem causar toxicidade.

A capacidade da cebola em acumular Se foi comprovada por Adhikari (2012) que, ao aplicar 50 mg m^{-2} de Se, obteve $8,31 \text{ mg g}^{-1}$ Se no bulbo de cebola. Golubkina et al. (2016), por sua vez, fornecendo $10 \text{ } \mu\text{g m}^{-2}$ de Se, observaram incremento de 45 para $140 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$ do elemento em bulbos de cebola em relação ao tratamento controle. Isso sugere que a adição de Se é útil para produzir bulbos com propriedades benéficas para a saúde humana sem prejudicar o desenvolvimento da cebola.

2.3 Cebola

A cebola (*Allium cepa*) é uma das mais antigas espécies vegetais cultivadas no mundo, tendo como centro de origem primária a Ásia central, especialmente Índia e Afeganistão (Mehta, 2017). No Brasil, foi introduzida pelos portugueses no litoral do Rio Grande do Sul, no século XVIII (Madeira et al., 2008) e, atualmente, está presente em grande parte do território nacional, sendo a terceira hortaliça mais cultivada no país, superada apenas por batata e tomate (Ferreira et al., 2018).

A possibilidade de uso tanto *in natura* em diversos preparos culinários e processada faz com que seja largamente consumida no Brasil e no mundo. A produção da cultura no ano de 2020 foi de 1,4 milhão de tonelada em 47,5 mil hectares cultivados, alcançando produtividade média de $31,4 \text{ t ha}^{-1}$, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021). No cenário nacional, o estado de São Paulo é o quarto maior produtor dessa hortaliça, correspondendo a 11% da produção total.

O bulbo, principal porção vegetal consumida da cebola, apresenta grande importância nutricional, pois contém altos teores de carboidratos, baixos teores de proteínas, excelentes teores de vitaminas A, B e C (Li et al., 2020), e de cálcio, ferro, fósforo, magnésio, potássio, sódio e selênio (USDA, 2015; Li et al., 2020). Além da rica composição nutricional, a cebola é uma excelente fonte de flavonoides, dentre eles a quercetina, substância antioxidante capaz de eliminar radicais livres do organismo humano (Galavi et al., 2021). Por isso, quando consumida regularmente, a cebola tem a capacidade de reduzir colesterol, pressão arterial e açúcares no sangue, diminuindo os riscos de ataque cardíaco, derrame vascular cerebral e diabetes. Outros benefícios proporcionados pela cebola incluem propriedades antibacteriana, antifúngica, antiasmática, anticancerígeno e hipoglicêmico, entre outros (Li et al., 2020; Galavi et al., 2021).

A cebola é conhecida, principalmente, pela pungência, que é produzida quando as células são rompidas mecanicamente, por corte ou maceração e é o que define o sabor e aroma característicos dessa espécie (Rodrigues et al., 2020; Cramer et al., 2021). Essa característica é afetada por fatores de crescimento, genéticos e ambientais, podendo ser influenciada pela concentração de S nas plantas (Cramer et al., 2021).

O mecanismo de produção da pungência está relacionado com a absorção de S e a síntese de precursores de sabor (Schunemann et al., 2006), que são regulados por reações de compostos organosulfurados presentes na cebola. Esses compostos originam-se da absorção de sulfato pelas plantas e subsequente incorporação de enxofre no aminoácido cisteína (Cramer et al., 2021). A partir disso, compostos sulfóxidos são produzidos, dentre eles o sulfóxido de 1-propenil-L-cisteína, o qual é o responsável por produzir o fator lacrimogêneo da cebola, além de compostos como ácido pirúvico, amônia e outros voláteis, que conferem sabores característicos das diferentes espécies do gênero *Allium* (Rodrigues et al., 2020).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido de abril a agosto de 2019 na área experimental da Universidade Estadual Paulista, campus Jaboticabal (21° 15' 22" S, 48° 15' 58" W, 615 m de altitude), Brasil. O clima da região é classificado como subtropical, com verões chuvosos e inverno relativamente seco, com precipitação média anual de 1.423,9 mm e temperatura média de 22,3 °C.

No período experimental, foram registrados 97,6, 24,2, 11,5, 9,3 e 10,4 mm de pluviosidade e 228, 227, 225, 251 e 243 h de insolação nos meses de abril, maio, junho, julho e agosto, respectivamente. A temperatura média no período foi de 21°C, com temperaturas mínimas e máximas médias de 9 e 32°C, respectivamente (Figura 1). Os dados foram obtidos na estação meteorológica da UNESP, município de Jaboticabal, estado de São Paulo, Brasil.

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho eutroférico típico de textura muito argilosa, segundo Santos et al. (2018).

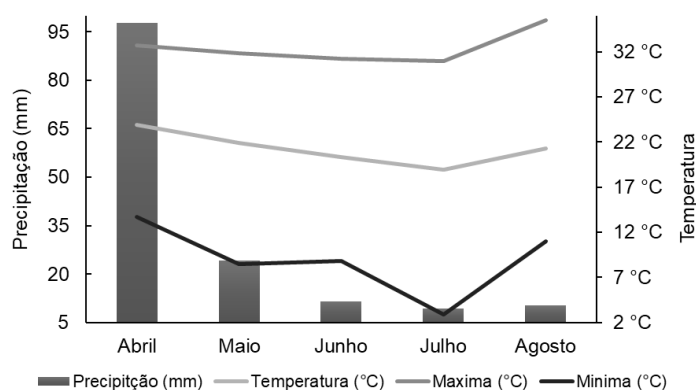


Figura 1. Média mensal de temperatura máxima (Tmax, °C), temperatura mínima (Tmin, °C), temperatura média (Tmed, °C) e precipitação na área experimental durante os meses de abril a agosto de 2019.

3.2 Tratamentos e desenho experimental

Os 12 tratamentos avaliados resultaram da combinação dos fatores doses de Se (0, 10, 25, 50, 100 e 200 g ha⁻¹) e forma de aplicação (solo ou foliar). O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 6 x 2

com quatro repetições. A parcela experimental constituiu-se de oito fileiras de 1,2 m de comprimento, espaçadas de 0,30 m, com área total de 2,88 m², sendo considerada parcela útil as quatro linhas centrais, excluindo uma planta em cada extremidade.

A fonte de Se utilizada foi o selenato de sódio (Na₂SeO₄). Para o método de aplicação do Se via solo, a dose de selenato de sódio de cada tratamento foi calculada para a área da unidade experimental e foi dissolvida em água e, em laboratório, pulverizada sobre a quantidade de fertilizante NPK (4-14-8) que seria aplicada em cada parcela. Após a secagem, o fertilizante foi aplicado e incorporado ao solo na profundidade de 0,20 m, em pré-transplante das mudas de cebola. Para o método de aplicação de Se via foliar, a solução contendo selenato de sódio foi pulverizada aos 77 dias após o transplante (DAT), quando as plantas apresentavam oito folhas (Pöldma et al., 2013). A pulverização foi manual com volume de 100 mL por parcela. Espalhante adesivo Tween® foi utilizado na concentração de 30 mL por 100 litros de solução. A aplicação foi realizada entre 16 e 18 h, período com condições climáticas adequadas (21°C e 53,8% de UR). Cada parcela foi isolada com uma cortina de plástico para proteger as plantas das demais parcelas de possível deriva de pulverização.

3.3 Instalação e condução do experimento

Antes do preparo do solo, foram coletadas amostras de solo na camada de 0-20 m para análises químicas, obtendo-se os seguintes resultados: 30 g dm⁻³ de matéria orgânica; 47 mg dm⁻³ P; 8 mg dm⁻³ S; 4,2 mmol dm⁻³ K; 28 mmol dm⁻³ Ca; 10 mmol dm⁻³ Mg; pH (em CaCl₂) de 5,9; saturação de bases (V) de 69% e conteúdo de Se não detectável de <0,1 mg kg⁻¹.

Com base na análise de solo e critérios recomendados por Trani et al. (2014), não foi necessária a realização de calagem na área, pois a saturação de bases estava adequada conforme recomendação para a cultura. O solo foi preparado com aração e gradagem, seguido de confecção dos canteiros. Foi realizada a incorporação de 750 kg ha⁻¹ de NPK 4-14-8 e 750 kg ha⁻¹ de superfosfato simples na camada de 0-0,20 m do solo.

As mudas de cebola do híbrido 'Dulciana' (Nunhems®) foram transplantadas no espaçamento de 0,30 m entre linhas e 0,10 m entre plantas na linha (Grangeiro et al., 2018). A irrigação por aspersão foi realizada de acordo com a demanda da cultura. Após a aplicação foliar de Se, a irrigação foi realizada com intervalo de 16 horas. O manejo de pragas, doenças e ervas daninhas foi realizado de acordo com a necessidade e as diretrizes descritas para a cultura por Nick e Borém (2018). A adubação de cobertura com N e K foi realizado aos 21 e 44 DAT utilizando ureia e cloreto de potássio como fontes desses nutrientes, respectivamente. Adicionalmente, foi realizada a aplicação foliar de 1 g L⁻¹ de B (ácido bórico) e 2 g L⁻¹ de Zn (sulfato de zinco) aos 26, 44 e 62 DAT.

A colheita foi realizada aos 135 DAT, quando 70% das plantas apresentavam o pseudocaule amolecido e as folhas tombadas. As plantas da área útil foram colhidas e deixadas cinco dias ao sol, com os bulbos protegidos pelas folhas. O processo de cura do bulbo foi concluído por mais 10 dias à sombra. As folhas foram eliminadas pelo corte do pseudocaule a 2 cm do bulbo.

3.4 Variáveis analisadas

Aos 56 e 90 DAT realizou-se a avaliação do estado nutricional das plantas, nos tratamentos que receberam Se via solo e via foliar, respectivamente. Uma folha jovem completamente expandida por planta de 20 plantas de cada unidade experimental foi coletada para compor cada amostra. As folhas foram lavadas em água corrente, com detergente e ácido clorídrico, água deionizada e, em seguida, colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar, a 65 °C, até obtenção de massa constante. Posteriormente, as amostras foram moídas em moinho tipo Willey. O material seco foi digerido e preparado para determinação das concentrações de macro e micronutrientes, conforme recomendação de Miyazawa et al. (2009).

As análises biométricas foram realizadas aos 90 DAT por meio da avaliação de 20 plantas na área útil da unidade experimental, sendo mensurada a altura de plantas, obtida pela distância entre solo e a maior folha, número de folhas, pela contagem das folhas não senescentes e diâmetro do pseudocaule, o qual foi mensurado na seção transversal na metade do comprimento do pseudocaule.

Após a colheita e a cura dos bulbos de cebola, foram avaliadas o diâmetro dos bulbos, por meio de paquímetro digital, e a classificação dos bulbos, de acordo com Ceagesp (2001). A produtividade foi calculada somando-se as massas de bulbos das plantas da parcela útil e estimada em $t\ ha^{-1}$.

Bulbos de oito plantas foram separados das folhas, descascados, cortados e secos em estufa de circulação forçada de ar a $65^{\circ}C$ até atingirem massa constante. Posteriormente, a matéria seca do bulbo foi determinada em uma balança de precisão.

Para a determinação do teor de Se, os bulbos foram descascados, fatiados e colocados para secar em estufa de circulação forçada de ar a $40^{\circ}C$ até atingirem massa constante. Posteriormente, as amostras foram moídas em um moinho Wiley. O teor de Se no bulbo foi determinado por espectrofotometria de absorção atômica em forno de grafite, em um extrato obtido por digestão ácida com ácido nítrico, de acordo com o método 3051A da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2007). Os teores de macro e micronutrientes no bulbo foram determinados de acordo com a recomendação de Miyazawa et al. (2009).

A pungência (P) da cebola foi determinada pela quantificação do ácido pirúvico, segundo metodologia proposta por Schwimmer e Weston (1961). A leitura foi realizada em espectrofotômetro a 420 nm e a concentração de ácido pirúvico foi feita utilizando a curva padrão do piruvato de sódio como referência. A produção enzimática de ácido pirúvico foi expressa em μmol de ácido pirúvico por grama de cebola.

3.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos a análise de variância pelo teste F, conforme delineamento experimental. As formas de aplicação (via solo ou foliar) de Se foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, e para as doses de Se foi feito o estudo de regressão.

4 RESULTADOS

A matéria seca do bulbo (média de 7,3 g), o teor de matéria seca do bulbo (média de 5,2%) e a pungência (média de 0,109 μmol de ácido pirúvico por grama de cebola fresca) não foram influenciados pelos fatores avaliados, enquanto a interação entre os fatores estudados afetou o teor de Se no bulbo (Tabela 1).

Tabela 1. Valores de F, significâncias e coeficientes de variação do teor de selênio no bulbo (Bulb-Se), massa seca do bulbo (BDM), teor de massa seca do bulbo (BDMC) e pungência (Pung.) em função das doses e formas de aplicação de selênio.

Fontes de variação	Bulb-Se	BDM	BDMC	Pung.
Doses de Se (D)	2433,53**	2,33 ^{ns}	0,33 ^{ns}	1,56 ^{ns}
Forma de aplicação (F)	367,32**	0,06 ^{ns}	3,55 ^{ns}	2,64 ^{ns}
D x F	41,69**	1,65 ^{ns}	2,26 ^{ns}	0,13 ^{ns}
C.V.(%)	5,8	18,49	14,09	18,44

** = significativo pelo teste de F ($p \leq 0.01$); ns: não significativo pelo teste de F ($p > 0.05$).

O teor de Se no bulbo aumentou com as doses aplicadas, com máximos atingidos na maior dose avaliada, independentemente da forma de aplicação. A concentração de Se no bulbo aumentou de 50,13 para 600,96 $\mu\text{g g}^{-1}$ na massa seca (MS) quando 10 e 200 g ha^{-1} de Se foram aplicados via solo, respectivamente, e de 75,07 para 706,57 $\mu\text{g g}^{-1}$ MS quando as mesmas doses foram aplicadas via pulverização foliar (Figura 2).

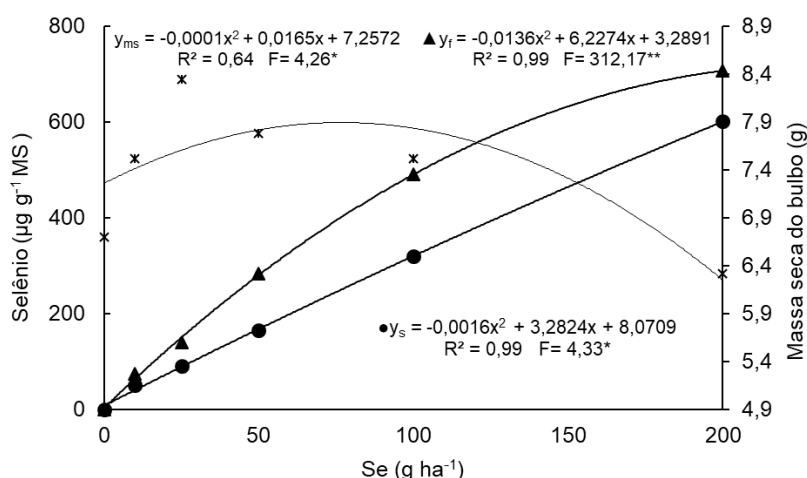


Figura 2. Massa seca do bulbo (MSB) e teor de selênio (Se) na massa seca do bulbo na cebola 'Dulciana' em função das doses e formas de aplicação de selênio (● via solo e ▲ via foliar).

A aplicação de Se via pulverização foliar foi mais eficiente na biofortificação do bulbo da cebola que via solo. A diferença no teor de Se entre as formas de aplicação aumentou de 17% na aplicação de 200 g ha⁻¹ para 71% na dose de 50 g ha⁻¹ de Se.

As concentrações foliares de N, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn não foram influenciadas pelo fornecimento de Se. Entretanto, as concentrações foliares de fósforo (P) e enxofre (S) foram influenciadas pelas doses de selênio (Se) via solo (Tabela 2).

Tabela 2. Valores de F, significâncias e coeficientes de variação dos teores foliares de macro e micronutrientes em função das doses de selênio aplicadas via solo e via foliar

Causas da Variação	Aplicação Se via solo									
	N	P	S	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
Dose de selênio	0,80 ^{ns}	10,42 ^{**}	6,46 ^{**}	0,54 ^{ns}	1,66 ^{ns}	1,32 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,72 ^{ns}	0,59 ^{ns}	0,78 ^{ns}
Bloco	0,58	0,91	1,43	0,67	2,09	6,94	0,77	0,92	0,07	4,40
C.V.(%)	4,54	18,49	10,71	3,98	9,4	6,81	22,19	51,5	15,04	21,68
Média	-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----				
	23,18	3,38	8,18	15,06	13,55	3,07	8,77	183,01	80,87	21,63
Equação 1º grau	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Equação 2º grau	ns	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Aplicação Se via foliar									
	N	P	S	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
Dose de selênio	11,92 ^{ns}	0,67 ^{ns}	1,03 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,73 ^{ns}
Bloco	2,53	1,56	1,52	2,96	5,41	1,40	1,42	1,36	2,38	0,19
C.V.(%)	13,44	16,46	14,65	5,86	16,67	13,54	21,13	56,2	27,94	35,99
Média	-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----				
	28,24	5,28	8,60	15,08	13,21	3,12	8,94	173,73	87,77	26,40
Equação 1º grau	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Equação 2º grau	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

** = significativo pelo teste F ($p \leq 0,01$); ^{ns} = não significativo pelo teste F ($p > 0,05$).

A maior concentração de P (4,7 g kg⁻¹) foi obtida com a aplicação de 177 g ha⁻¹ de Se (Figura 3A), acréscimo de 87% em relação ao tratamento sem aplicação de Se (0 g ha⁻¹). A concentração de S foliar nas plantas de cebola atingiu seu máximo (9,7 g kg⁻¹) na dose de 145 g ha⁻¹ de Se, a partir apresentou tendência a redução a partir dessa dose (Figura 3B).

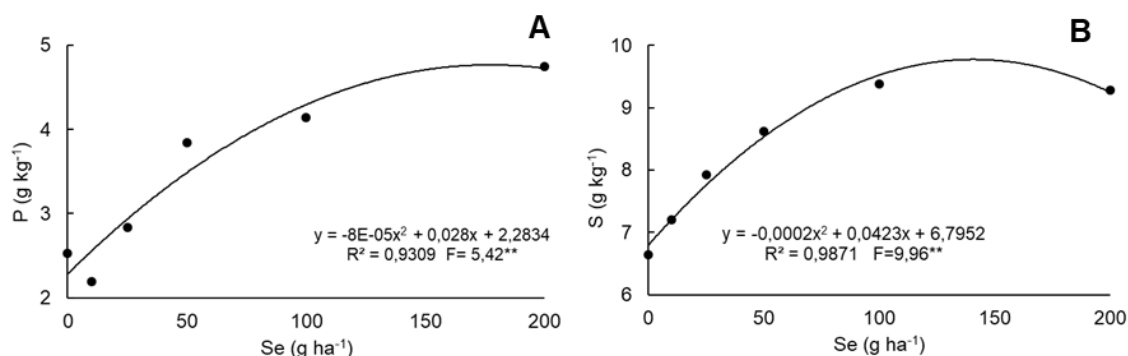


Figura 3. Concentração foliar de P e S em cebola 'Dulciana' em função das doses de selênio aplicadas via solo.

Doses de Se e formas de aplicação não influenciaram a altura de plantas, o número de folhas por planta e o diâmetro do pseudocaule. No entanto, houve ajuste quadrático para as médias de diâmetro do bulbo e produtividade em função das doses de Se (Tabela 3).

Tabela 3. Valores de F, significâncias e coeficientes de variação de altura de plantas (AP), número de folhas (NF), diâmetro do pseudocaule (DP), diâmetro do bulbo (DB) e produtividade em função da dose e da forma de aplicação de selênio.

Causas da Variação	AP	NF	DP	DB	PROD
Forma de aplicação (F)	0,06 ^{ns}	2,64 ^{ns}	0,73 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,41 ^{ns}
Dose de selênio (D)	1,55 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,83 ^{ns}	4,03 ^{**}	1,07 ^{ns}
F X D	1,19 ^{ns}	0,50 ^{ns}	0,66 ^{ns}	0,57 ^{ns}	1,54 ^{ns}
C.V.(%)	4,1	5,5	10,4	7,7	17,4
Equação 1 grau	ns	ns	ns	ns	ns
Equação 2 grau	ns	ns	ns	**	**

** = significativo pelo teste F ($p \leq 0,01$); ^{ns} = não significativo pelo teste F ($p > 0,05$).

O diâmetro do bulbo aumentou até a dose de 100 g ha⁻¹ de Se, representando aumento de 13% em relação às plantas que não receberam Se. Porém, a aplicação de 200 g ha⁻¹ de Se fez com que o diâmetro do bulbo reduzisse ao tamanho observado em plantas que não foram adubadas com Se (Figura 4A).

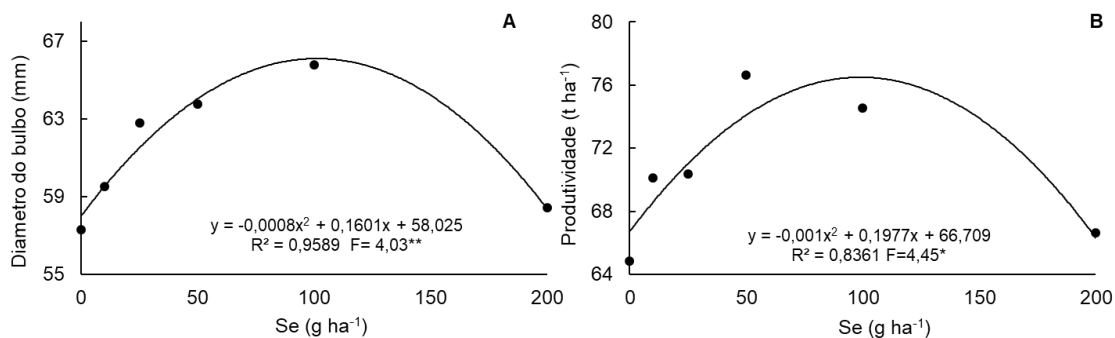


Figura 4. Diâmetro do bulbo (mm) e produtividade (t ha⁻¹) de cebola ‘Dulciana’ em função das doses de Se.

A produtividade da cultura aumentou até a dose estimada de 99 g ha⁻¹ de Se, quando atingiu 76,5 t ha⁻¹ (Figura 4B), 14,7% maior que a observada em plantas não adubadas com Se. Por outro lado, o aumento de doses de Se causou redução continuada da produtividade, atingindo 66,2 t ha⁻¹ com a aplicação de 200 g ha⁻¹ de Se, queda de 11% em relação à dose de 99 g ha⁻¹ de Se, resultando em uma produtividade menor que a obtida em plantas não adubadas com Se.

5 DISCUSSÃO

A biofortificação dos bulbos de cebola foi observada, uma vez que a aplicação de selenato de sódio aumentou a concentração de Se no bulbo da cebola (Figura 2), corroborando Sharma et al. (2007), que aplicaram 5 mg L⁻¹ de Se na forma de selenato de sódio em cebolas cultivadas em vasos e observaram 1172 µg g⁻¹ de Se no peso seco dos bulbos. Pöldma et al. (2013) também relataram aumentos de até 350% no conteúdo de Se em bulbos de cebola pulverizados com 50 g ha⁻¹ de selenato de sódio.

Entre os métodos de fornecimento do Se, a aplicação foliar promoveu maior teor de Se no bulbo que a aplicação via solo (Figura 2). A maior eficiência da pulverização foliar em relação à aplicação no solo na biofortificação do bulbo provavelmente se deve a processos mais rápidos de absorção e assimilação de Se pelas folhas, uma vez que não há necessidade de translocação do elemento da raiz para as folhas e bulbo (Winkel et al., 2015). Além disso, as perdas de Se devido à imobilização de Se no solo são evitadas quando o fornecimento de Se ocorre via

pulverização foliar (Hawrylak-Nowak et al., 2018; Hasanuzzaman et al., 2020). Conforme relatado por Ros et al. (2016), a biofortificação de Se via pulverização foliar pode ser até oito vezes mais eficaz que a aplicação via solo em algumas culturas.

Os resultados obtidos com o processo da biofortificação precisam ser analisados considerando-se o teor de Se no bulbo e o limite aceitável de Se no corpo humano. No Brasil, o consumo diário recomendado de Se para homens e mulheres adultos saudáveis é de $55 \mu\text{g dia}^{-1}$ de Se (Reis et al., 2018), e o consumo médio *per capita* de cebola pela população brasileira é pequeno, sendo 6,8 kg por ano, ou 18,5 g por dia, de acordo com a FAO (2018). Levando em consideração essas informações, a biofortificação da cebola poderia ser realizada com o fornecimento de 15,0 e 8,8 g ha^{-1} de Se via solo ou via foliar, respectivamente. Para crianças e gestantes e lactantes, os quais têm demandas menores (20 a $40 \mu\text{g dia}^{-1}$ Se, dependendo da idade) e maiores (60 a $70 \mu\text{g dia}^{-1}$ Se) que a de um adulto (Institute of Medicine, 2000), as quantidades de cebola a serem consumidas diariamente, considerando as mesmas doses via foliar ($8,8 \text{ g ha}^{-1}$ de Se) e via solo ($15,0 \text{ g ha}^{-1}$ de Se), devem ser menores ($13,4$ a $6,7 \text{ g por dia}$) e maiores ($20,2$ e $23,5 \text{ g por dia}$), respectivamente. Para causar toxicidade (selenose) em adultos saudáveis, a ingestão de Se teria que ser superior a $400 \mu\text{g}$ de Se ao dia (Guillin et al., 2019), demandando o consumo de 135 g dia^{-1} de cebola *in natura*, o que é muito pouco provável.

A biofortificação agrônômica da cebola com Se mostrou-se viável e economicamente é interessante, visto que a relação benefício/custo é elevada, ou seja, apenas $35,8$ e $21,0 \text{ g ha}^{-1}$ de selenato de sódio anidro ($41,8\%$ Se) seriam necessários para aplicações via solo e foliar, respectivamente, a um custo de R\$ 334,50 e R\$ 196,20 por hectare, respectivamente.

Além disso, a matéria-prima vegetal biofortificada pode ser usada para a fabricação de produtos alimentícios “funcionais” (Mayurnikova et al., 2020). Pesquisas neste campo têm sido realizadas como o uso de trigo biofortificado com Se para a produção de pão e macarrão (Wang et al., 2021), bem como cenouras para a produção de suco com alto teor de Se (Skoczylas et al., 2020). Como a cebola é amplamente utilizada como ingrediente em alimentos processados, o uso

dessa hortaliça biofortificada com Se na indústria alimentícia é uma estratégia para aumentar a diversidade de produtos contendo Se no mercado e aumentaria o alcance de Se em vários segmentos da população. Levando em consideração os resultados obtidos neste estudo, observou-se que a biofortificação por meio da fertilização da cebola pode promover altos teores de Se no bulbo, podendo chegar a 600,55 e 704,77 $\mu\text{g g}^{-1}$ de Se na cebola desidratada, via solo e aplicação foliar de Se, respectivamente. Devido ao alto teor de Se na cebola desidratada, uma pequena quantidade (microgramas) desta cebola seria suficiente para fazer 1 kg de produto industrializado biofortificado, proporcionando altíssimo rendimento industrial e tendo sucesso no aumento do consumo de Se pela população.

Como uma tentativa de alterar o teor de Se na parte comestível das plantas, a aplicação de Se também pode influenciar no metabolismo destas. O aumento da concentração foliar de fósforo (P) com o incremento da dose de Se aplicado via solo (Figura 3A) pode ser explicada pela conversão de selenato em selenito para que ocorra a assimilação do nutriente nas folhas das plantas por meio das enzimas adenosina trifosfato sulfurilase e adenosina 5'-fosfosulfato redutase. Essas enzimas contêm P em sua composição e, portanto, especula-se que com o aumento da absorção de Se pela planta haverá maior necessidade dessas enzimas, demandando maior quantidade de P para o processo de assimilação (White, 2018). Embora o teor de P foliar tenha sido alterado, a qualidade nutricional do bulbo não foi influenciada pela aplicação de Se.

Por outro lado, a relação observada entre as concentrações de Se e S pode ser explicada pela semelhança química entre essas moléculas, permitindo que o selenato presente no solo seja absorvido pela membrana da raiz por meio de transportadores de sulfato (Boldrin et al., 2016). O fornecimento de Se via adubação faz com que os transportadores de S se liguem com maior frequência ao Se, elevando assim a concentração do elemento no interior da planta. Em espécies de plantas acumuladoras de Se, como a cebola, as raízes tendem a aumentar a expressão de genes que codificam transportadores de sulfato de alta afinidade, o que resulta em maior capacidade de absorção de sulfato e, por consequência, de selenato (Boldrin et al., 2016). Entretanto, as concentrações desses ânions na solução do solo influenciam na seletividade dos transportadores de sulfato, sendo

que a frequência de ligação ao selenato é maior quando há altas concentrações de sulfato (Barak; Goldman, 1997).

Vale ressaltar que a seletividade exercida pelos transportadores para esses ânions também pode variar de acordo com a espécie vegetal e o estado nutricional da planta (Schiavon et al., 2015). Além disso, as espécies da família *Allium*, como a cebola, são capazes de aumentar ligeiramente o acúmulo de S quando cultivados em baixas doses de Se (Kopsell e Randle, 1997), acumulando compostos tiosulfina, característicos dessas plantas. Porém, em altas concentrações de Se, ocorre a inibição do acúmulo do S nas plantas (Golubina, 2016), como observado no presente estudo (Figura 3B).

Apesar do aumento do teor de S foliar, a pungência do bulbo não foi influenciada pelas doses de Se aplicada, independente da forma de aplicação (Tabela 1). A pungência da cebola é a combinação do sabor e aroma exalados quando os tecidos são rompidos e expostos ao O₂. Os principais precursores do aroma característico da cebola são os compostos sulfurados, os quais apresentam em sua composição cisteína. Esperava-se, então, que a aplicação de Se reduzisse a pungência em plantas de cebola, uma vez que o sulfato é necessário para a biossíntese da cisteína, que é um aminoácido importante para a biossíntese de compostos aromáticos em cebola (Mobini et al., 2019). Portanto, a redução da pungência poderia ser obtida pela substituição parcial de S por Se, o que promoveria a produção de selenocisteína no lugar de cisteína (Larsen et al., 2006). Porém, essa relação não foi confirmada (Tabela 1), contrariando resultado observado por Kopsell; Randle; Eiteman (1999) e Mobini et al. (2019). Uma vez que cisteína e selenocisteína não foram determinados no presente estudo, talvez, a não alteração da pungência pode ser atribuída à característica genética do híbrido 'Dulciana', a qual apresenta baixa pungência. Entretanto, a ausência de aumento da pungência mediante fornecimento de Se concordou com o observado por Pöldma et al. (2013), os quais verificaram que o aumento na disponibilidade de Se à cebola reduziu o teor de S no bulbo, mas não influenciou a pungência.

Os aumentos nas concentrações foliares de P e S em decorrência da aplicação de Se não repercutiram positivamente nos aspectos biométricos altura, número de folhas e diâmetro do pseudocaule de cebola, que não foram

influenciados pela fertilização com Se independentemente da forma de aplicação (Tabela 3). Resultados contrastantes foram obtidos por Kápolna et al. (2012), que observaram danos graves às folhas de cebola após a aplicação foliar de 100 μg de Se mL^{-1} na forma de selenato de sódio, o que resultou na concentração de 9,6 $\mu\text{g g}^{-1}$ de Se na massa seca foliar. Assim, a diferença na resposta obtida no presente estudo em relação a esses autores pode ser explicada pelas doses aplicadas, uma vez que no estudo de Kápolna et al. (2012) a dose de Se utilizada foi 5,8 vezes maior.

Outro aspecto relevante em programas de biofortificação é a relação com a produtividade. Verificou-se efeito positivo do Se na produtividade e no diâmetro de bulbo de cebola do híbrido 'Dulciana' até 99 e 100 g ha^{-1} de Se, respectivamente. A resposta da produtividade da cebola ao fornecimento de Se corrobora os resultados obtidos por Pöldma et al. (2013), que verificaram incrementos de 16% na produtividade de bulbos ao aplicarem, via pulverização foliar, 25 g ha^{-1} de Se (como selenato de sódio), assim como Bybordi et al. (2018), que obtiveram acréscimos de 52% na produtividade ao aplicarem 1 kg ha^{-1} de Se, na forma de selenato de sódio.

Os incrementos na produtividade em função da aplicação do Se podem ser justificados pela ação benéfica do elemento no aumento de clorofila (Ashraf et al., 2018; Lara et al., 2019; Alves et al., 2020; Lanza e Reis, 2021) e, consequentemente, a taxa fotossintética da planta, o que resulta em ganhos na produtividade. Além disso, o Se, também tem a capacidade de controlar a produção e redução de espécies reativas de oxigênio nas plantas (Feng et al., 2013; Chauhan et al., 2019), que, por consequência, diminui o estresse oxidativo e reduz as perdas de produtividade.

O efeito negativo de altas doses de Se na planta de cebola também foi observado no presente trabalho, o qual foi percebido pelas reduções de 13% e 11% na produtividade e diâmetro de bulbo, respectivamente (Figuras 4A e 4B). Observa-se, então, que a faixa entre a dose benéfica e a dose fitotóxica de Se às plantas é muito estreita, conforme reportou Zhou et al. (2020). Essa questão também foi observada por Pöldma et al. (2013), que alcançaram aumento na produtividade de cebola quando aplicada dose de 25 g ha^{-1} de Se, enquanto a aplicação de 50 g ha^{-1}

de Se reduziu a produtividade da cultura, o que foi apontado pelos autores como os primeiros sinais de toxicidade.

Quando em baixas concentrações na planta, o Se é estimulador do sistema antioxidante e redutor de espécies reativas de oxigênio, por outro lado, altas concentrações elevam a produção dessas espécies reativas de oxigênio (Feng et al., 2013). Isso ocorre porque o Se utiliza de glutathione para sua assimilação, enzima que também tem função no combate às espécies reativas de oxigênio (Feng et al., 2013; Hoewyk et al., 2013). Em elevadas concentrações de Se, a enzima passa a ser insuficiente para desempenhar ambas as funções, permitindo que a planta acumule espécies reativas de oxigênio causando toxicidade, que é caracterizada pela clorose foliar, diminuição da síntese proteica, redução do crescimento (Prakash et al., 2010; Corbo et al., 2018) e, conseqüentemente, queda na produtividade (Feng et al., 2013; Mateus et al., 2021).

Em suma, a dose de 99 g ha⁻¹ de Se, que proporcionou maior produtividade, proporciona também altas concentrações de Se no bulbo e pode trazer riscos à saúde humana. Então, por motivo de segurança alimentar, a dose a ser recomendada de Se na biofortificação de cebola fica limitada ao fornecimento de 55 mg dia⁻¹ de Se, o que é conseguindo aplicando-se 8,8 ou 15,0 g Se ha⁻¹ via foliar e via solo, respectivamente.

6 CONCLUSÕES

As aplicações via solo e foliar de Se foram eficientes para a biofortificação de bulbos de cebola, sendo a aplicação foliar mais eficiente que a aplicação no solo.

As doses de Se necessárias para fornecer a quantidade diária de Se recomendadas para adultos saudáveis são de 15,0 e 8,8 g ha⁻¹ de Se para aplicação no solo e via foliar, respectivamente.

Devido à sua versatilidade de uso na indústria alimentícia e capacidade de acumular Se no bulbo, aplicado no solo ou via foliar, a cebola desidratada biofortificada pode ser utilizada como matéria-prima para a biofortificação de alimentos processados.

Apesar de estar acima da dose recomendada para atender ao consumo humano, os benefícios do Se à cebola foram comprovados pelo aumento de diâmetro de bulbo e de produtividade até as doses 100 e 99 g de Se ha⁻¹, respectivamente.

7 REFERÊNCIAS

- Adhikari P (2012) **Biofortification of selenium in broccoli and onion**. 53f. Dissertação (Mestrado em Plant Science), Norwegian University of Life Sciences, Norway, As.
- Alfthan G et al. (2015) Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: From deficiency to optimal selenium status of the population. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology** 31:142–147.
- Alves LR, Rossatto DR, Rossi ML, Martinelli AP, Gratão PL (2020) Selenium improves photosynthesis and induces ultrastructural changes but does not alleviate cadmium-stress damages in tomato plants. **Protoplasma** 257:597–605.
- Andrade FR, Silva GN, Guimarães KC, Barretos HBF, Souza KRD, Guilherme LRG, Faquin V, Reis AR (2018) Selenium protects rice plants from water deficit stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 164:562–570.
- Aro A, Alfthan G, Varo P (1995) Effects of supplementation of fertilizers on human selenium status in Finland Analyst. **The Analyst** 120:841–843.
- Ashraf MA, Akbar A, Parveen A, Rasheed R, Hussain I, Iqbal M (2018) Phenological application of selenium differentially improves growth, oxidative defense and ion homeostasis in maize under salinity stress. **Plant Physiology and Biochemistry** 123:268–280.
- Barak P, Goldman IL (1997) Antagonistic Relationship between Selenate and Sulfate Uptake in Onion (*Allium cepa*): Implications for the Production of Organosulfur and Organoselenium Compounds in Plants. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 45:1290-1294.
- Boldrin PF et al (2016) Selenium promotes sulfur accumulation and plant growth in wheat (*Triticum aestivum*). **Physiologia Plantarum** 158:80–91.
- Bouis HE, Saltzman A (2017) Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. **Global Food Security** 12:49–58.
- Brasil, Ministério da Agricultura, do desenvolvimento rural e das pescas. (2010). **Decreto-Lei nº 54/2010**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil.
- Buturi CV, Mauri RP, Fogliano V, Leonardi C, Giuffrida F (2021) Mineral Biofortification of Vegetables as a Tool to Improve Human Diet. **Foods** 223:1 – 23.
- Bybordi A, Saadat S, Zargaripour P (2018) The effect of zeolite, selenium and silicon on qualitative and quantitative traits of onion grown under salinity conditions. **Archives of Agronomy and Soil Science** 64:520-530.

CEAGESP. Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo. **Classificação da cebola**. 2001. Disponível em: < <http://www.ceagesp.gov.br/wp-content/uploads/2015/07/cebola.pdf>>. Acesso em: 10 out 2018.

Chauhan R, Srivastava S, Dwivedi S, Pilon-Smits EAH, Dhankher OP, Tripathi RD (2019) Understanding selenium metabolism in plants and its role as a beneficial element. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology** 21:1937-1958.

Choi W-G, Hilleary R, Swanson SJ, Kim S-H, Gilroy S (2016) Rapid, long-distance electrical and calcium signaling in plants. **Annual Review of Plant Biology** 67:287-307.

Corbo JZF, Coscione AR, Berton RS, Moreira RS, Moreira RS, Carbonell SAM, Chiorato AF (2018) Toxicity and Translocation of Selenium in *Phaseolus vulgaris* L. **Journal of Agricultural Science** 10:296-302.

Cramer CS, Mandal S, Sharma S, Nourbakhsh SS, Goldman I, Guzman I (2021) Recent Advances in Onion Genetic Improvement. **Agronomy** 482: 1-16.

D'Amato R et al. (2020) Current Knowledge on Selenium Biofortification to Improve the Nutraceutical Profile of Food: A Comprehensive Review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 68:4075–4097.

Das A, Laha S, Mandal S, Pal S, Siddiqui MW (2018) Preharvest Biofortification of Horticultural Crops. In.: Siddiqui MW (Eds.) **Preharvest Modulation of Postharvest Fruit and Vegetable**. Elsevier, p. 381-434.

Ekumah JN, Ma Y, Akpabli-Tsigbe NDK, Kwaw E, Ma S, Hu J (2021) Global soil distribution, dietary access routes, bioconversion mechanisms and the human health significance of selenium: A review. **Food Bioscience** 41:100960.

Fakhrolmobasheri M, Mazaheri-Tehrani S, Kieliszek M, Zeinalian M, Abbasi M, Karimi F, Mozafari AM (2021) COVID-19 and Selenium Deficiency: a Systematic Review. **Biological Trace Element Research**, 199:1-12.

FAO, **Food balance and sheeps: consumption, onions** (2018). Retrieved from <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>

Faria LA, Karp FHS (2015) Selênio: um elemento essencial ao homem e aos animais e benéfico as plantas. **Informações Agronômicas** 149:17-22.

Feng R, Wei C, Tu S (2013) The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. **Environmental and Experimental Botany** 87:58–68.

Ferreira KS, Gomes JC, Bellato CR, Jordão CP (2002) Concentrações de selênio em alimentos consumidos no Brasil. **Revista Panamericana de Salud Pública** 11: 172 – 177.

Ferreira MG, Alves FM, Nick C (2018) A cultura. In: Nick C, Borém A (Eds.) **Cebola do plantio à colheita**. Viçosa: UFV, p. 9-18.

Ferreira RLC, Prado RM, Souza Junior JP, Gratão PL, Tezotto T, Cruz FJR (2020) Oxidative Stress, Nutritional Disorders, and Gas Exchange in Lettuce Plants Subjected to Two Selenium Sources. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 20: 1215–1228.

Ferreira RLU, Sena-Evangelista KCM, de Azevedo EP, Pinheiro FI, Cobucci RN, Pedrosa LFC (2020) Selenium in Human Health and Gut Microflora: Bioavailability of Selenocompounds and Relationship With Diseases. **Frontiers Nutrition** 8:685317.

Fordyce M (2013) Selenium deficiency and toxicity in the environment. In: Selinus O, Alloway B, Centeno JA (Eds.) **Essentials of Medical Geology**, Springer: Dordrecht, p. 375-416.

Gabos MB, Alleoni LRF, Abreu CA (2014) Background levels of selenium in some selected Brazilian tropical soils. **Journal of Geochemical Exploration** 145:35–39.

Galavi A, Hosseinzadeh H, Razavi BM (2021) The effects of *Allium cepa* L. (onion) and its active constituents on metabolic syndrome: A review. **Iranian Journal of Basic Medical Sciences** 24:3-16

Golubkina NA (2016) Prospects of onion (*Allium cepa* L.) fertilization by selenium. **Trace Elements in Medicine** 17:4-9.

Grangeiro LC, Factor TL, Júnior JMB, Cecílio Filho AB (2018) Preparo do solo e plantio. In: Nick C, Borém A (Eds.) **Cebola Do Plantio à Colheita**. Viçosa: Editora UFV, p. 41-57.

Guillin OM, Vindry C, Ohlmann T, Chavatte L (2019) Selenium, selenoproteins and viral infection. **Nutrients** 11:1–33.

Hasanuzzaman M, Bhuyan MHMB, Raza A, Hawrylak-Nowak B, Matraszek-Gawron R, Mahmud JA, Nahar K, Fujita M (2020) Selenium in plants: Boon or bane? **Environmental and Experimental Botany** 178:104170.

Hawrylak-Nowak B (2013) Comparative effects of selenite and selenate on growth and selenium accumulation in lettuce plants under hydroponic conditions. **Plant Growth Regulation** 70:149–157.

Hawrylak-Nowak B, Dresler S, Rubinowska K, Matraszek-Gawron R, Woch W, Hasanuzzaman M (2018) Selenium biofortification enhances the growth and alters the physiological response of lamb's lettuce grown under high temperature stress. **Plant Physiology and Biochemistry** 127:446–456.

Hawrylak-Nowak B, Matraszek, R, Pogorzelec, M (2015) The dual effects of two inorganic selenium forms on the growth, selected physiological parameters and macronutrients accumulation in cucumber plants. **Acta Physiologiae Plantarum** 41:1 – 13.

Hoewyk D (2013) A tale of two toxicities: malformed selenoproteins and oxidative stress both contribute to selenium stress in plants. **Annals of Botany** 112:965–972.

Hossain A et al. (2021) Selenium biofortification: roles, mechanisms, responses and prospects. **Molecules** 881: 1 - 29.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021) **Produção Agrícola Municipal**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612#notas-tabela>>. Acesso em: 10 dez. 2021.

Ilbas AI, Yilmaz S, Akbulut M, Bogdevich O (2012) Uptake and distribution of selenium, nitrogen and sulfur in three barley cultivars subjected to selenium applications, **Journal of Plant Nutrition** 35:442-452.

Institute of Medicine Food and Nutrition Board the National Academies with Health Canada (2000) **Dietary Reference Intakes for Vitamin C, Vitamin E, Selenium, and Carotenoids**. Washington: National Academies Press (US).

Kápolna E, Laursen KH, Husted S, Larsen EH (2012) Bio-fortification and isotopic labelling of Se metabolites in onions and carrots following foliar application of Se and ⁷⁷Se. **Food Chemistry** 133:650–657.

Kieliszek M (2019) Selenium–Fascinating Microelement, Properties and Sources in Food. **Molecules** 24:1298.

Kieliszek M, Bano I, Zare H (2022) A comprehensive review on selenium and its effects on human health and distribution in middle eastern countries. **Biological Trace Element Research** 200:971–987.

Kopsell DA, Randle WM (1997) Selenate concentration affects selenium and sulfur uptake and accumulation by “Granex 33” onions. **Journal of the American Society for Horticultural Science** 122:721–726.

Kopsell DA, Randle WM, Eiteman MA (1999) Changes in the S-alk(en)yl Cysteine Sulfoxides and their Biosynthetic Intermediates during Onion Storage. **Journal of the American Society for Horticultural Science** 124:177-183.

Kushwaha A, Goswami L, Lee J, Sonne C, Brown RJC, Kim KH (2021) Selenium in soil-microbe-plant systems: Sources, distribution, toxicity, tolerance, and detoxification. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology** 1:1-39.

Lanza MGDB, Reis AR (2021) Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. **Plant Physiology and Biochemistry**, 164:27-43.

Lara TS, Lessa JHL, Corguinha APB, Martins FAD, Lopes G, Guilherme LRG (2019) Selenium biofortification of wheat grain via foliar application and its effect on plant metabolism. **Journal of Food Composition and Analysis** 81:10–18.

Larsen EH et al (2006) Uptake and speciation of selenium in garlic cultivated in soil amended with symbiotic fungi (mycorrhiza) and selenite. **Analytical and Bioanalytical Chemistry** 385:1098-1108.

Li Q, Wang Y, Mai Y, Li H, Wang Z, Xu J, He X (2020) Health benefits of the flavonoids from onion: constituents and their pronounced antioxidant and anti-neuroinflammatory capacities **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 68:799–807.

Li Y, Wang W, Luo K, Li H (2008) Environmental behaviors of selenium in soil of typical selenosis area, China. **Journal of Environmental Sciences** 20:859–864.

Lindon FC et al (2018) Selenium biofortification of rice grains and implications on macronutrients quality. **Journal of Cereal Science** 81:22-29.

Łukaszewicz S, Politycka B, Smoleń S (2019) Accumulation of selected macronutrients and tolerance towards selenium of garden pea treated with selenite and selenite. **Journal of Elementology** 24: 245-256.

Madeira NR, Reifschneider FJB, Giordano LB (2008) Contribuição portuguesa à produção e ao consumo de hortaliças no Brasil: uma revisão histórica. **Horticultura Brasileira** 26: 428-432.

Maihara VA, Gonzaga IB, Silva VL, Fávaro DIT, Vasconcellos MBA, Cozzolino SMF (2004) Daily dietary selenium intake of selected Brazilian population groups. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry** 259:465-468.

Malagoli M, Schiavon M, dall'Acqua S, Pilon-Smits EAH (2015) Effects of selenium biofortification on crop nutritional quality. **Frontiers in Plant Science** 6:1-5.

Malerba M, Cerana R (2018) Effect of Selenium on the Responses Induced by Heat Stress in Plant Cell Cultures. **Plants** 7:1-18.

Mateus MPB, Tavanti RFR, Tavant TR, Santos EF, Jalal A, Reis AR (2021) Selenium biofortification enhances ROS scavenge system increasing yield of coffee plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 209: 1-18.

Mayurnikova L, Krapiva T, Kurakin M, Koksharov A, Shalimova D (2020) Technology of plant raw material production with high-ratio selenium for food products manufacturing. **E3S Web of Conferences** 161:1-5.

Mehta I (2017) Origin and History of Onions. **Journal of Humanities And Social Science** 22:7- 10.

Miyazawa M, Pavan MA, Muraoka T, Carmo, CAFS, Melo WJ de (2009) Análise química de tecido vegetal. In: Silva FC (Ed) **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: EMBRAPA, p. 191-233.

Mobini M, Khoshgoftarmanesh AH, Ghasemi S (2019) Biofortification of onion bulb with selenium at different levels of sulfate. **Journal of Plant Nutrition** 42:269-277.

Moreda-Piñeiro J, Sánchez-Piñero J, Mañana-López A, Turnes-Carou I, Alonso-Rodríguez E, López-Mahía P, Muniategui-Lorenzo S (2018) Selenium species determination in foods harvested in seleniferous soils by HPLC-ICP-MS after enzymatic hydrolysis assisted by pressurization and microwave energy. **Food Research International** 111:621–630.

Nick C, Borém A (2018) **Cebola do plantio à colheita**. Viçosa: Editora UFV.

Pérez MB, Lipinski VM, Filippini MF, Chacón-Madrid K, Arruda Maz, Wuilloud RG (2019) Selenium biofortification on garlic growth and other nutrients accumulation. **Horticultura Brasileira** 37: 294-301.

Pezzarossa B, Rosellini I, Borghesi E, Tonuttic P, Malorgio F (2014) Effects of Se-enrichment on yield, fruit composition and ripening of tomato (***Solanum lycopersicum***) plants grown in hydroponics. **Scientia Horticulturae** 165:106–110.

Põldma P, Moor U, Tonutare T, Herodes K, Reban R (2013) Selenium treatment under field conditions affects mineral nutrition, yield and antioxidant properties of bulb onion (*Allium cepa* L.) **Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus** 12: 167-181.

Prakash NT, Sharma N, Prakash R, Nathaniel TN, Acharya R, Reddy VR (2010) Selenium fortification and pro/anti oxidant responses in *Allium cepa* (onion) cultivated in se supplemented soils. **Experimental Agriculture** 46:531–540.

Puccinelli M, Malorgio, F, Pezzarossa, B (2017) Selenium Enrichment of Horticultural Crops. **Molecules** 22:1-18.

Pyrzynska K, Sentkowska A (2021) Selenium in plant foods: speciation analysis, bioavailability, and factors affecting composition. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 61:1–13.

Rady MM, Belal HEE, Gadallah FM, Semida WM (2020) Selenium application in two methods promotes drought tolerance in *Solanum lycopersicum* plant by inducing the antioxidant defense system. **Scientia Horticulturae** 266:109290.

Rayman MP (2002) The argument for increasing selenium intake. **Proceedings of the Nutrition Society** 61:203-215.

Rayman MP (2012) Selenium and human health. **The Lancet** 379:1256–1268

Rayman, MP (2020) Selenium intake, status, and health: a complex relationship. **Hormones** 19:9–14.

Reis AR, Furlani Júnior E, Moraes MF, de Melo SP (2014) Biofortificação agronômica com selênio no Brasil como estratégia para aumentar a qualidade dos produtos agrícolas. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering** 8: 128-138.

Reis HPG, Barcelos JPQ, Furlani Junior E, Santos EF, Silva VM, Moraes MF, Putti FF, Reis AR (2018) Agronomic biofortification of upland rice with selenium and nitrogen and its relation to grain quality. **Journal of Cereal Science** 79:508-515.

Reis, AR dos, El-Ramady H, Santos EF, Gratão PL, Schomburg L (2017) Overview of Selenium Deficiency and Toxicity Worldwide: Affected Areas, Selenium-Related Health Issues, and Case Studies. In: Pilon-Smits EAH, Winkel LHE, Lin ZQ (Eds) **Selenium in Plants: Molecular, Physiological, Ecological and Evolutionary Aspects** Springer International Publishing, p. 209-230.

Rios JJ, Blasco B, Leyva R, Sanchez-Rodriguez E, Rubio-Wilhelmi MM, Romero L, Ruiz JM (2013) Nutritional balance changes in lettuce plant grown under different doses and forms of selenium. **Journal of Plant Nutrition**, 36:1344–1354.

Rodrigues LU, Tavares TCO, Faria AJG, Tomazi MC, Tavares RC, Nascimento IR (2020) Uso do enxofre nos componentes de produção e qualidade de bulbos de cebola. **Journal of bioenergy and food science** 7:1-11.

Ros GH, van Rotterdam AMD, Bussink DW, Bindraban PS (2016) Selenium fertilization strategies for bio-fortification of food: an agro-ecosystem approach. **Plant and Soil** 404:99–112.

Saha U, Fayiga A, Sonon L (2017) Selenium in the Soil-Plant Environment: A Review. **International Journal of Applied Agricultural Sciences** 3:1-18.

Saltzman A, Birol E, Bouis HE, Boy E, de Moura FF, Islam Y, Pfeiffer WH (2013) Biofortification: Progress toward a more nourishing future. **Global Food Security** 2:9–17.

Santos HG dos, Jacomine PKT, Anjos LHC dos, Oliveira, VÁ de. (2018) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Solos.

Schiavon M, Nardi S, Vecchia FD, Ertani A (2020) Selenium biofortification in the 21st century: status and challenges for healthy human nutrition. **Plant Soil** 453:245-270.

Schiavon M, Pilon M, Malagoli M, Pilon-Smits EAH (2015) 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** 6:1-13.

Schiavon M, Pilon-Smits EAH (2017) Selenium Biofortification and Phytoremediation Phytotechnologies: A Review. **Journal of Environmental Quality** 46:10–19.

Schunemann AP, Treptow R, Leite DL, Vendruscolo JL (2006) Pungência e características químicas em bulbos de genótipos de cebola (*Allium cepa* L.) cultivados no alto vale do itajaí, sc, brasil. **Revista Brasileira de Agrociência** 12:77-80.

Schwimmer S, Weston WJ (1961) Enzymatic development of pyruvic acid in onion as a measure of pungency. **Agricultural and food chemistry** 9:301–304.

Seale LA, Torres DJ, Berry MJ, Pitts MW (2020) A role for selenium-dependent GPX1 in SARS-CoV-2 virulence. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 112:447–448.

Sharma N, Kumar A, Prakash R, Prakash NT (2007) Selenium accumulation and selenium-induced anti-oxidant activity in *Allium cepa*. **Environmental Informatics Archives** 5:328–336.

Silva DF, Cipriano PE, Souza RR, Siueia Junior M, Faquin V, Silva MLS, Guilherme LRG (2020) Biofortification with selenium and implications in the absorption of macronutrients in *Raphanus sativus* L. **Journal of Food Composition and Analysis** 86:103382.

Silva EN, Cidade M, Heerdt G, Ribessi RL, Morgon NH, Cadore S (2018) Effect of Selenite and Selenate Application on Mineral Composition of Lettuce Plants Cultivated Under Hydroponic Conditions: Nutritional Balance Overview Using a Multifaceted Study. **Journal of the Brazilian Chemical Society** 29:371-379.

Silva VM et al. (2021) Application of sodium selenate to cowpea (*Vigna unguiculata* L.) increases shoot and grain Se partitioning with strong genotypic interactions. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology** 67:126781.

Skoczylas Ł, Tabaszewska M, Smoleń S, Słupski J, Liszka-Skoczylas M, Barański R (2020) Carrots (*Daucus carota* L.) Biofortified with Iodine and Selenium as a Raw Material for the Production of Juice with Additional Nutritional Functions. **Agronomy** 10:1-17.

Tavanti TR, de Melo AAR, Moreira LDK, Sanchez DEJ, Silva RS, da Silva, RM, dos Reis AR (2021) Micronutrient fertilization enhances ROS scavenging system for alleviation of abiotic stresses in plants. **Plant Physiology and Biochemistry** 160:386–396.

Terry N, Zayed AM, Souza MP, Tarun AS (2000) Selenium in Higher Plants **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology** 51:401–432.

Tinggi U (2003) Essentiality and toxicity of selenium and its status in Australia: A review. **Toxicology letters** 137:103–110.

Trani PE et al. (2014) Instruções agrícolas para as principais culturas agrônômicas, Campinas/SP: IAC. 7.^a ed p. 121-124. (Boletim Técnico 200).

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. 2015. Disponível em: <<https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/3076?manu=&fgcd=>>. Acesso em: 5 out. 2018

USEPA, 2007 METHOD 3051A, METHOD 3051A

Vinceti M, Filippini T, Wise LA (2018) Environmental Selenium and Human Health: an Update. **Current Environmental Health Reports** 5:464–485

Wang M, Li B, Li S, Song Z, Kong F, Zhang X (2021) Selenium in wheat from farming to food. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 1-37.

White PJ (2018) Selenium metabolism in plants. **BBA - General Subjects**, 1862:2333–2342.

White PJ, Broadley MR (2009) Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. **New Phytologist** 182: 49–84.

Winkel LHE, Vriens B, Jones GD, Schneider LS, Pilon-Smits E, Bañuelos GS (2015) Selenium cycling across soil-plant-atmosphere interfaces: A critical review. **Nutrients** 6:4199-4239.

Yadav S, Gupta S, Prakash R, Spallholz J, Prakash NT (2007) Selenium uptake by *Allium cepa* grown in Sespiked soils. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences** 2:80-84.

Yang C, Yao H, Wu Y, Sun G, Yang W, Li Z, Shang (2021) Status and risks of selenium deficiency in a traditional selenium-deficient area in Northeast China. **Science of the Total Environment** 762:144103.

Yang H, Yang X, Ning Z, Kwon SY, Li M, Tack FMG, Kwon EE, Rinklebe J, Y Runsheng (2022) The beneficial and hazardous effects of selenium on the health of the soil-plant-human system: An overview. **Journal of Hazardous Materials** 422: 126876.

Younesian O, Khodabakhshi B, Abdolahi N, Behnampour N, Hosseinzadeh S, Alarzi SSH, Joshaghani H (2021) Decreased Serum Selenium Levels of COVID-19 Patients in Comparison with Healthy Individuals. **Biological Trace Element Research**, 199:1-6.

Zhang H, Zhao Z, Nie B, Lyu C, Liu X (2021) Selenium loss and changes in product quality during cooking of selenium enriched potato tubers. **Journal of Food Composition and Analysis** 96:1-7.

Zhou X, Yang J, Kronzucker H, Shi W (2020) Selenium Biofortification and Interaction With Other Elements in Plants: A Review. **Frontiers in Plant Science** 11: 586421.