



FABRÍCIO TEIXEIRA DE LIMA GOMES

**PRODUÇÃO E QUALIDADE DE FRUTOS DE TOMATE EM
FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE ZINCO E SELÊNIO**

LAVRAS – MG

2024

FABRÍCIO TEIXEIRA DE LIMA GOMES

**PRODUÇÃO E QUALIDADE DE FRUTOS DE TOMATE EM FUNÇÃO DA
APLICAÇÃO DE ZINCO E SELÊNIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.



Documento assinado digitalmente

MARIA LIGIA DE SOUZA SILVA

Data: 06/08/2024 10:52:01-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. Maria Ligia de Souza Silva
Orientadora

**LAVRAS - MG
2024**

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

Gomes, Fabrício Teixeira de Lima.

Produção e qualidade de frutos de tomate em função da
aplicação de zinco e selênio / Fabrício Teixeira de Lima Gomes. -
2024.

73 p. : il.

Orientador(a): Maria Ligia de Souza Silva.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. *Solanum lycopersicum* L. 2. Biofortificação agrônômica. 3.
Segurança alimentar. I. Silva, Maria Ligia de Souza. II. Título.

O conteúdo desta obra é de responsabilidade do(a) autor(a) e de seu orientador(a).

FABRÍCIO TEIXEIRA DE LIMA GOMES

**PRODUÇÃO E QUALIDADE DE FRUTOS DE TOMATE EM FUNÇÃO DA
APLICAÇÃO DE ZINCO E SELÊNIO**

**PRODUCTION AND QUALITY OF TOMATO FRUITS AS A FUNCTION OF THE
APPLICATION OF ZINC AND SELENIUM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 05 de julho de 2024.

Dra. Maria Ligia de Souza Silva

Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho

Dr. Milton Ferreira de Moraes

UFLA

UNESP

UFMT

Profa. Dra. Maria Ligia de Souza Silva
Orientadora

**LAVRAS - MG
2024**

Aos meus avós, Fátima (In memoriam) e Luíz Antônio (In memoriam), por todo apoio e amor incondicional.

Aos meus pais, Ada Meire e Benvindo, pelo exemplo de vida e incentivo ao estudo.

À todos os professores que me acompanharam até este momento.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo discernimento e amor, que, mesmo imerecido, me sustentaram até aqui.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Ciência do Solo e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, por proporcionarem toda a estrutura e suporte para a realização das pesquisas e pela oportunidade desta formação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento das pesquisas.

À Dra. Maria Ligia, pela orientação durante a graduação e o mestrado, pela paciência, amizade e ensinamentos que foram de grande relevância para o meu crescimento profissional.

À técnica de laboratório, Aline, meus sinceros agradecimentos pela amizade e auxílio que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores, Dr. Vitor de Laia Nascimento, Dra. Luciane Vilela Resende, Dr. Eduardo Valério de Barros Vilas Boas, Dr. Milton Ferreira de Moraes e Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho, pelas contribuições dadas durante a realização e avaliações deste trabalho.

Aos meus pais, Ada Meire e Benvindo, pelo amor, apoio e incentivo que foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Sou eternamente grato por tudo o que fizeram e fazem por mim.

Aos meus avós, Fátima (*in memoriam*) e Luíz Antônio (*in memoriam*), agradeço por todo o carinho e ensinamentos. Suas memórias e valores continuarão a me guiar e inspirar sempre. Vocês serão eternamente lembrados com muito amor e saudade.

À minha irmã, Cristiane, agradeço pela amizade e apoio constantes. Sou muito grato por ter uma irmã tão maravilhosa.

À minha prima e amiga, Marcilene, obrigado por todo carinho e por estar ao meu lado em todos os momentos.

À minha amiga, Estela, pela amizade e companheirismo ao longo desta jornada. Sua presença tornou os momentos difíceis mais leves e os momentos felizes ainda mais especiais.

Aos meus amigos, Amanda, Ane Caroline, Beatriz, Edinei, Eduarda, Francis, Lívia, Luís Guilherme, Moniky, Patrick e Vanessa. Sou grato por ter compartilhado essa experiência com vocês.

Por fim, um agradecimento especial a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que eu alcançasse este importante objetivo.

Muito obrigado!

RESUMO

A deficiência de selênio (Se) e zinco (Zn) na população representa um desafio para a saúde global, constituindo uma forma significativa de desnutrição humana. Nesse contexto, a biofortificação de alimentos básicos com micronutrientes surge como uma estratégia eficaz para aumentar o teor de nutrientes nos alimentos, combatendo, assim, a desnutrição. As plantas desempenham um papel crucial na bioacumulação de Zn e Se nas cadeias alimentares. Assim, considerando o amplo consumo e os diversos benefícios à saúde humana decorrentes do consumo regular de tomate, esta hortaliça torna-se uma cultura estratégica em estudos de biofortificação. No presente estudo foram realizados três experimentos em condições de casa de vegetação com os seguintes objetivos: (i) avaliar o efeito da aplicação de Se e Zn, separadamente, via solo, na produção do tomateiro e no teor de nutrientes e Se na parte aérea e nos frutos; e (ii) avaliar o efeito da aplicação simultânea de Se e Zn na produção e qualidade do tomate. No terceiro experimento, os frutos foram avaliados quanto ao número de frutos por planta, peso de fruto, produtividade, diâmetro, comprimento, parâmetros de cor e firmeza. Além disso, foram analisados o pH, sólidos solúveis totais, acidez titulável, teores de licopeno, β -caroteno, vitamina C, fenólicos totais, flavonoides totais, antocianinas totais e composição de nutrientes e Se. Os resultados dos dois primeiros experimentos mostraram que as aplicações de Se e Zn aumentaram os teores desses elementos na parte aérea e nos frutos. Além disso, o Se aumentou os teores de N, S, Fe e Mn, porém doses superiores a $100 \mu\text{g dm}^{-3}$ causaram fitotoxicidade nas plantas. Por outro lado, a aplicação de Zn reduziu os teores de P, K, Ca e Fe. Portanto, doses baixas de Se são preferíveis, pois fornecem a quantidade adequada de Se sem comprometer a produtividade do tomateiro, enquanto novos estudos são necessários para aumentar o teor de Zn nos frutos. Os resultados do terceiro experimento mostraram aumento na massa dos frutos com a aplicação de Se associada a 4 mg dm^{-3} de Zn, o que contribuiu para maior produtividade. Além disso, o fornecimento de Se e Zn elevou os teores de β -caroteno, vitamina C, flavonoides totais e antocianinas totais, além de aumentar os teores de Se, Zn, N e Cu nos frutos. Esses resultados indicam que a biofortificação simultânea com Se e Zn possui grande potencial para melhorar a qualidade do tomate. A adição de Se é importante para enriquecer os frutos, devido à baixa disponibilidade desse elemento no solo, enquanto a dose de Zn deve ser ajustada conforme a finalidade específica.

Palavras - chave: *Solanum lycopersicum* L; biofortificação agronomica; segurança alimentar.

ABSTRACT

Selenium (Se) and zinc (Zn) deficiency in the population represents a challenge for global health, constituting a significant form of human malnutrition. In this context, biofortification of basic foods with micronutrients appears as an effective strategy to increase the nutrient content in foods, thus combating malnutrition. Plants play a crucial role in the bioaccumulation of Zn and Se in food chains. Thus, considering the widespread consumption and various benefits to human health resulting from regular consumption of tomatoes, this vegetable becomes a strategic crop in biofortification studies. In the present study, three experiments were carried out under greenhouse conditions with the following objectives: (i) to evaluate the effect of applying Se and Zn, separately, via soil, on tomato production and on the nutrient and Se content in the shoots and in the fruits; and (ii) to evaluate the effect of simultaneous application of Se and Zn on tomato production and quality. In the third experiment, the fruits were evaluated regarding the number of fruits per plant, fruit weight, yield, diameter, length, color, and firmness parameters. In addition, pH, total soluble solids, titratable acidity, lycopene, β -carotene, vitamin C, total phenolics, total flavonoids, total anthocyanins, and nutrient and Se composition, were analyzed. The results of the first two experiments showed that the application of Se and Zn increased the levels of these elements in the shoots and fruits. Furthermore, Se increased the levels of N, S, Fe, and Mn, but doses greater than $100 \mu\text{g dm}^{-3}$ caused phytotoxicity in plants. On the other hand, the application of Zn reduced the levels of P, K, Ca, and Fe. Therefore, low doses of Se are preferable, as they provide an adequate amount of Se without compromising tomato yield, while new studies are needed to increase the Zn content in the fruits. The results of the third experiment showed an increase in fruit mass with the application of Se associated with 4 mg dm^{-3} of Zn, which contributed to greater yield. Furthermore, the supply of Se and Zn increased the levels of β -carotene, vitamin C, total flavonoids, and total anthocyanins, in addition to increasing the levels of Se, Zn, N, and Cu in the fruits. These results indicate that simultaneous biofortification with Se and Zn has great potential to improve tomato quality. The addition of Se is important to enrich the fruits, due to the low availability of this element in the soil, while the dose of Zn must be adjusted according to the specific purpose.

Keywords: *Solanum lycopersicum* L.; agronomic biofortification; food security.

INDICADORES DE IMPACTOS

A biofortificação agronômica não apenas visa melhorar a qualidade nutricional dos alimentos, mas também possui o potencial de gerar impactos positivos em diversas esferas sociais, tecnológicas, econômicas e culturais, contribuindo para um futuro mais sustentável e saudável. Um dos principais benefícios da biofortificação é sua capacidade de combater deficiências nutricionais humanas, especialmente em regiões vulneráveis. Nesse contexto, a introdução de alimentos ricos em nutrientes, como selênio (Se) e zinco (Zn), pode ajudar a reduzir doenças relacionadas à deficiência desses elementos, impactando diretamente os sistemas de saúde pública. Em relação aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, a biofortificação de alimentos está alinhada com várias metas importantes, incluindo a erradicação da pobreza (ODS 1), a promoção da segurança alimentar e nutricional (ODS 2) e o estímulo à saúde e bem-estar (ODS 3). No presente estudo, foi verificado o efeito da aplicação de Se e Zn, via solo, na qualidade do tomate, visando a obtenção de frutos ricos em nutrientes, sem redução na produtividade e nas concentrações de compostos bioativos, importantes para a manutenção da saúde humana. Os resultados mostraram que, quando aplicados separadamente, o consumo de 100 gramas de tomate fresco de plantas cultivadas com a adição de $25 \mu\text{g dm}^{-3}$ de Se e 16 mg dm^{-3} de Zn poderia contribuir para o suprimento de 17,16% e 0,87% da dose dietética recomendada (RDA) de Se e Zn, respectivamente. Por outro lado, visando a biofortificação simultânea do tomate com esses elementos, o consumo de 100 gramas de tomate fresco cultivado com a adição de $50 \mu\text{g dm}^{-3}$ de Se combinada com 12 mg dm^{-3} de Zn poderia satisfazer 11,28% e 2,93% da RDA de Se e Zn, respectivamente. Portanto, o consumo de tomates biofortificados pode ser uma alternativa para aumentar a ingestão desses elementos, contribuindo para a segurança alimentar. Além de aumentar os teores de Se e Zn no tomate, os resultados mostraram que a aplicação de Se e Zn contribuiu para a melhoria da biossíntese de compostos bioativos, resultando em um produto com maior valor nutricional. Esses resultados são cruciais para a melhoria no manejo nutricional da cultura, visando a obtenção de produtos de qualidade. Além disso, os resultados obtidos podem contribuir para que novos produtos sejam desenvolvidos contendo estes elementos para uso na agricultura, especialmente o Se. O tomate biofortificado pode apresentar maior valor agregado quando comparado aos convencionais, aumentando a rentabilidade do produtor. Assim, o presente estudo tem potencial para impactar positivamente a sociedade, contribuindo para o desenvolvimento social, tecnológico, econômico e cultural.

IMPACT INDICATORS

Agronomic biofortification not only aims to improve the nutritional quality of food, but also has the potential to generate positive impacts in various social, technological, economic and cultural spheres, contributing to a more sustainable and healthier future. One of the main benefits of biofortification is its ability to combat human nutritional deficiencies, especially in vulnerable regions. In this context, the introduction of foods rich in nutrients, such as selenium (Se) and zinc (Zn), can help reduce diseases related to deficiency of these elements, directly impacting public health systems. In relation to the UN Sustainable Development Goals (SDGs), food biofortification is aligned with several important goals, including eradicating poverty (SDG 1), promoting food and nutrition security (SDG 2) and boosting health and well-being (SDG 3). In the present study, the effect of applying Se and Zn, via soil, on tomato quality was verified, aiming to obtain fruits rich in nutrients, without reducing productivity and concentrations of bioactive compounds, important for maintaining human health. The results showed that, when applied separately, the consumption of 100 grams of fresh tomato from plants grown with the addition of $25 \mu\text{g dm}^{-3}$ of Se and 16 mg dm^{-3} of Zn could contribute to the supply of 17.16% and 0.87% of the recommended dietary allowance (RDA) of Se and Zn, respectively. On the other hand, aiming at the simultaneous biofortification of tomatoes with these elements, the consumption of 100 grams of fresh tomato grown with the addition of $50 \mu\text{g dm}^{-3}$ of Se combined with 12 mg dm^{-3} of Zn could satisfy 11.28% and 2.93% of the RDA of Se and Zn, respectively. Therefore, the consumption of biofortified tomatoes can be an alternative to increase the intake of these elements, contributing to food security. In addition to increasing the levels of Se and Zn in tomatoes, the results showed that the application of Se and Zn contributed to improving the biosynthesis of bioactive compounds, resulting in a product with greater nutritional value. These results are crucial for improving the nutritional management of the crop, aiming to obtain quality products. Furthermore, the results obtained can contribute to the development of new products containing these elements for use in agriculture, especially Se. Biofortified tomatoes can have greater added value when compared to conventional ones, increasing the producer's profitability. Thus, the present study has the potential to positively impact society, contributing to social, technological, economic and cultural development.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	11
1 INTRODUÇÃO.....	11
REFERÊNCIAS	13
SEGUNDA PARTE – ARTIGOS	15
ARTIGO 1 - AGRONOMIC BIOFORTIFICATION WITH SELENIUM AND ZINC AND THEIR EFFECTS ON THE NUTRIENT CONTENT AND TOMATO PRODUCTION	15
ARTIGO 2 - EFEITOS DA APLICAÇÃO SIMULTÂNEA DE SELÊNIO E ZINCO NA QUALIDADE DO TOMATE	45
TERCEIRA PARTE	73
CONSIDERAÇÕES FINAIS	73

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

O selênio (Se) e o zinco (Zn) são essenciais para seres humanos e animais (Yang *et al.*, 2022; Younas *et al.*, 2023). Contudo, estima-se que cerca de 15% e 30% da população mundial seja deficiente em Se e Zn, respectivamente (Avnee *et al.*, 2023). A deficiência desses elementos na dieta causa efeitos adversos no organismo humano, afeta o crescimento e desenvolvimento, potencializa o declínio cognitivo, além de aumentar a ocorrência de doenças e mortalidade (Chasapis *et al.*, 2020; Rayman, 2020). Assim, a biofortificação agrônômica tem sido utilizada para o enriquecimento nutricional de cultura básicas da alimentação humana por meio da fertilização, sendo considerada uma solução rápida, eficaz e viável para a produção de alimentos ricos em nutrientes (Cakmak; Kutman, 2018; Szerement *et al.*, 2022).

Nas plantas, o Zn é essencial para uma série de reações metabólicas, bioquímicas e fisiológicas (Sturikova *et al.*, 2018). Faz parte da composição de todas as classes de enzimas, atua na regulação e ativação de genes, síntese de proteínas, metabolismos de carboidratos, é fator chave para a integridade estrutural dos ribossomos e auxilia na estabilidade da membrana celular ao eliminar as espécies reativas de oxigênio via enzima Cu-Zn-SOD (Rehman *et al.*, 2019; Shabbir *et al.*, 2020). Por outro lado, embora não seja essencial, o Se é um elemento benéfico, conferindo tolerância contra estresses abióticos, além de aumentar a taxa fotossintética e melhorar as trocas gasosas, estimulando o crescimento e desenvolvimento das plantas (Chauhan *et al.*, 2019; Hasanuzzaman *et al.*, 2020).

Na dieta humana, as plantas são as principais fontes destes elementos; entretanto, muitas culturas não contêm naturalmente quantidades suficientes para satisfazer as necessidades nutricionais humanas (Ahmed *et al.*, 2024). O tomate (*Solanum lycopersicum* L.), membro da família Solanaceae, é a segunda hortaliça mais importante no mundo, depois da batata. A produção mundial de tomate em 2021 foi de aproximadamente 189 milhões de toneladas de frutos colhidos em uma área de 5,2 milhões de hectares (FAO, 2022). O Brasil, em 2022, ocupou a 8ª posição no ranking mundial, com produção de 3,8 milhões de toneladas e 54,5 mil hectares cultivados, alcançando produtividade média de 69.905 kg ha⁻¹ de tomate (IBGE, 2024).

O consumo crescente de tomate se deve aos seus inúmeros benefícios à saúde e à variedade de produtos disponíveis no mercado. É uma excelente fonte de nutrientes e compostos bioativos importantes para a saúde humana, incluindo carotenóides como licopeno e β-caroteno, vitamina C e E, compostos fenólicos e minerais (Chaudhary *et al.*, 2018; Lima *et al.*, 2022).

Nesse sentido, tem sido considerado um alimento funcional, o que significa que o seu consumo regular pode prevenir algumas doenças humanas (Perveen., *et al.*, 2015). Portanto, o consumo de tomates biofortificados pode contribuir para a ingestão diária de Zn e Se, reduzindo assim as deficiências nutricionais e melhorando a saúde da população (Freire *et al.*, 2020).

Em tomateiro, estudos têm relatado efeitos da aplicação de Se e Zn isoladamente no metabolismo das plantas, influenciando a síntese de compostos bioativos, a produção de frutos e o desenvolvimento do tomateiro (Puccinelli *et al.*, 2019; Singh *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2018). Contudo, pouco se sabe sobre os efeitos da aplicação simultânea, via solo, desses elementos nas plantas e nas propriedades nutracêuticas dos frutos. A adição de dois elementos pode resultar em interações entre eles, podendo afetar a absorção, distribuição e/ou função de outros elementos nas plantas, influenciando a produção e a qualidade dos alimentos (Zhou *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2021; Gui *et al.*, 2022). Assim, são necessários estudos para melhor compreensão das possíveis interações entre Se e Zn e as implicações sobre a produção e qualidade do tomate, visando a adoção das melhores estratégias de manejo da adubação para a cultura.

A dissertação está dividida em dois capítulos apresentados na forma de artigos para publicação em revistas científicas. No primeiro capítulo, intitulado “*Agronomic biofortification with selenium and zinc and their effects on the nutrient content and tomato production*”, foram realizados dois experimentos, simultaneamente, para avaliar o efeito de doses de Se e Zn em tomateiro, aplicadas via solo, visando à biofortificação do tomate com esses elementos. Neste estudo, avaliamos a produção de biomassa, os componentes de produção e a composição de elementos na parte aérea e nos frutos. No segundo capítulo, com o título “*Efeitos da aplicação simultânea de selênio e zinco na qualidade do tomate*”, avaliamos as características físico-bioquímicas e a composição de minerais nos frutos, para, assim, definir as melhores doses dos elementos para a biofortificação do tomate.

REFERÊNCIAS

- AHMED, N. *et al.* Micronutrients and their effects on horticultural crop quality, productivity and sustainability. **Scientia Horticulturae**, v. 323, p. 112512, 2024.
- AVNEE *et al.* Biofortification: an approach to eradicate micronutrient deficiency. **Frontiers in Nutrition**, v. 10, p. 1233070, 14 set. 2023.
- CAKMAK, I.; KUTMAN, U. B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: A review. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 172–180, 1 jan. 2018.
- CHASAPIS, C. T. *et al.* Recent aspects of the effects of zinc on human health. **Archives of toxicology**, v. 94, p. 1443-1460, 2020.
- CHAUDHARY, P. *et al.* Bioactivities of phytochemicals present in tomato. **Journal of Food Science and Technology**, v. 55, n. 8, p. 2833–2849, 1 ago. 2018.
- CHAUHAN, R. *et al.* Understanding selenium metabolism in plants and its role as a beneficial element. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 21, p. 1937–1958, 2 nov. 2019.
- FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION - FAO. **Food and agriculture data**. 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em 10 jun. 2024.
- FREIRE, B. M. *et al.* Biofortification of crop plants: a practical solution to tackle elemental deficiency. **Sustainable Solutions for Elemental Deficiency and Excess in Crop Plants**, p. 135–182, 28 nov. 2020.
- GUI, J. *et al.* Interaction between selenium and essential micronutrient elements in plants: A systematic review. **Science of The Total Environment**, v. 853, p. 158673, 2022.
- HASANUZZAMAN, M. *et al.* Selenium in plants: Boon or bane? **Environmental and Experimental Botany**, v. 178, p. 104170, 1 out. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Produção de tomate no Brasil. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/tomate/br>. Acesso em: 10 jun. 2024.
- KUMAR, S; KUMAR, S; MOHAPATRA, T. Interaction between macro-and micro-nutrients in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 665583, 2021.
- LIMA, G. P. P. *et al.* Functional and nutraceutical compounds of tomatoes as affected by agronomic practices, postharvest management, and processing methods: A mini review. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, p. 868492, 2022.
- PERVEEN, R. *et al.* Tomato (*Solanum lycopersicum*) carotenoids and lycopenes chemistry; metabolism, absorption, nutrition, and allied health claims - a comprehensive review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 55, n. 7, p. 919–929, 7 jun. 2015.
- PUCCINELLI, M. *et al.* Effect of selenium enrichment on metabolism of tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit during postharvest ripening. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 5, p. 2463–2472, 30 mar. 2019.

RAYMAN, Margaret P. Selenium intake, status, and health: A complex relationship. **Hormones**, v. 19, n. 1, p. 9-14, 2020.

REHMAN, S. *et al.* Effect of salinity on cadmium tolerance, ionic homeostasis and oxidative stress responses in conocarpus exposed to cadmium stress: Implications for phytoremediation. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 171, p. 146–153, 30 abr. 2019.

SHABBIR, Z. *et al.* Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment. **Chemosphere**, v. 259, p. 127436, 1 nov. 2020.

SINGH, B. *et al.* Growth, yield and quality of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum* var. cerasiforme) as influenced by foliar application of Zinc and Boron. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. Vol. 6, n.6, 2017.

STURIKOVA, H. *et al.* Zinc, zinc nanoparticles and plants. **Journal of hazardous materials**, v. 349, p. 101-110, 2018.

SZEREMENT, J. *et al.* Agronomic biofortification with Se, Zn, and Fe: An effective strategy to enhance crop nutritional quality and stress defense-A review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 1, p. 1129-1159, 2022.

YANG, H. *et al.* The beneficial and hazardous effects of selenium on the health of the soil-plant-human system: An overview. **Journal of hazardous materials**, v. 422, p. 126876, 2022.

YOUNAS, N. *et al.* Alleviation of zinc deficiency in plants and humans through an effective technique; biofortification: A detailed review. **Acta Ecologica Sinica**, v. 43, n. 3, p. 419-425, 2023.

ZHOU, X. *et al.* Selenium biofortification and interaction with other elements in plants: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 586421, 2020.

ZHU, Z. *et al.* Selenium delays tomato fruit ripening by inhibiting ethylene biosynthesis and enhancing the antioxidant defense system. **Food Chemistry**, v. 219, p. 179–184, 15 mar. 2017.

ZHU, Z. *et al.* Exploring the effects of selenium treatment on the nutritional quality of tomato fruit. **Food Chemistry**, v. 252, p. 9–15, 30 jun. 2018.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

**ARTIGO 1 - AGRONOMIC BIOFORTIFICATION WITH SELENIUM AND ZINC
AND THEIR EFFECTS ON THE NUTRIENT CONTENT AND TOMATO
PRODUCTION**

(Formatado de acordo com as normas do periódico *Scientia Horticulturae*)

Agronomic biofortification with selenium and zinc and their effects on the nutrient content and tomato production

Fabrício Teixeira de Lima Gomes^a, Amanda Santana Chales^a, Edinei José Armani Borghi^a, Ane Caroline Melo Ferreira^a, Beatriz Costa de Oliveira Queiróz de Souza^b, Luíz Guilherme Malaquias da Silva^c, Vitor de Laia Nascimento^b, Maria Ligia de Souza Silva^{a*}

^aDepartment of Soil Science, Federal University of Lavras (ESAL/UFLA), Lavras, 37200-900, MG, Brazil.

^bDepartment of Biology, Federal University of Lavras, Lavras (ICN/UFLA), 37200-900, MG, Brazil

^cDepartment of Food Science, Federal University of Lavras (ESAL/UFLA), 37200-900, Lavras, MG, Brazil.

*Corresponding author: E-mail address: marialigia.silva@ufla.br (M.L.S. Silva).

Abstract

Zinc and selenium are essential for humans and animals. To improve the nutritional quality of food, agronomic biofortification has been used through the fertilization of crops with these elements. Thus, this study aimed to evaluate the application of Se and Zn via soil and investigate their influence on nutrient content and tomato production. The experiments were conducted under greenhouse conditions with a completely randomized design. The treatments consisted of four doses of Zn (2, 4, 8 and 16 mg dm⁻³ - ZnCl₂) and four doses of Se (25, 50, 100 and 200 µg dm⁻³ - Na₂SeO₄), with four repetitions. In each experiment, a control was added where there was no application of the elements. The supply of Se and Zn increased the levels of the respective elements in the shoots and fruits. The Se application contributed to the increase of N, S, Fe and Mn contents. However, doses above 100 µg dm⁻³ of Se demonstrated phytotoxic effects on plants. The Zn application reduced the P, K, Ca and Fe content. New studies should be carried out to increase the Zn content in tomatoes. Low doses of Se are preferable to provide adequate Se intake and did not reduce tomato yield.

Keywords: Tomato fruit; Ionic interactions; Food security; Nutritional quality; Plant nutrition; Horticulture.

1 Introduction

Zinc (Zn) and selenium (Se) are essential for animals and humans (Yang et al., 2022; Younas et al., 2023). The deficiency of these elements in the diet causes adverse effects on the human body, affecting growth and development, enhancing cognitive decline, and increasing the occurrence of diseases and mortality (Chasapis et al., 2020; Rayman, 2020). The recommended intake of Zn is 11 mg day⁻¹ for men and 8 mg day⁻¹ for women (Chasapis et al., 2020), while the dietary dose of Se is 50 - 70 µg day⁻¹ for adult humans (Kieliszek et al., 2022). However, it is estimated that about 15% and 30% of the world's population are deficient in Se and Zn, respectively (Avnee et al., 2023).

The deficiency of Se and Zn in humans is attributed to the low availability of these elements in agricultural soils, resulting in the production of food with low concentrations of these nutrients (Dinh et al., 2018; Natasha et al., 2022). Thus, agronomic biofortification has been used for the nutritional enrichment of crops through fertilization, being considered a fast, effective, and viable solution for the production of nutrient-rich food (Cakmak and Kutman, 2018; Szerement et al., 2022). However, the success of agronomic biofortification depends on the mobility of the element (soil and plant), the available content in the soil, and the accumulation capacity of the species (Bhardwaj et al., 2022).

Vegetables are widely used in biofortification programs due to their importance for human health, their wide consumption by the population, and their short production cycle (Buturi et al., 2021). Among vegetables, tomato (*Solanum lycopersicum* L.) stands out as an excellent source of nutrients and bioactive compounds important for human health, including phenolic compounds and carotenoids (Lima et al., 2022; Wang et al., 2023). Therefore, tomato biofortification with Se and Zn can increase dietary intake of these elements in the diet, reduce deficiency, and contribute to improving human health.

The supply of Se and Zn can influence the absorption, distribution, and function of other elements in plants (Zhou et al., 2020; Kumar et al., 2021; Gui et al., 2022). Therefore, analyzing the concentrations of elements in plant tissues is essential not only for optimizing the biofortification process and improving the nutritional value of food, but also for identifying potential changes in the nutritional balance of plants, which can result in reduced crop growth and yield (Huang et al., 2020; Khan et al., 2023).

Studies on the supply of Se and Zn via soil aiming at tomato biofortification and the implications for the nutritional status of the tomato plant are scarce in the current literature.

Thus, the objective of this study was to evaluate tomato agronomic biofortification with Se and Zn, applied via soil, as well as their implications for the nutrient content and tomato plant yield. The initial hypothesis of our study was that the application of Se and Zn via soil is an effective approach to biofortify tomato without compromising nutrient absorption and tomato plant yield.

2 Materials and methods

2.1 Experimental design

To verify the effects of fertilization with different doses of Se and Zn in tomato plants, two experiments were conducted simultaneously from January to May 2023. Both studies were performed in a completely randomized design with five treatments and four replications. Each repetition consisted of a pot with one tomato plant (*Solanum lycopersicum* L. cv. Micro-Tom, wild-type genotype - WT). In the first trial, four doses of Se (25, 50, 100, and 200 $\mu\text{g dm}^{-3}$ of soil) were tested, applied in the form of sodium selenate (Na_2SeO_4). In the second trial, four doses of Zn (2, 4, 8, and 16 mg dm^{-3} of soil) were tested, applied in the form of zinc chloride (ZnCl_2). For each trial, a control where the elements were not applied was included. All treatments were applied via soil, in the form of a nutrient solution, seven days after transplanting (DAT) the seedlings. The Se doses based on studies Silva et al. (2020) and Reis et al. (2019) in tropical soils. The Zn doses were defined based on the recommendation for tomato plants cultivation in soil with a low natural content of the element (Cantarella et al., 2022).

2.2 Cultivation conditions

The experiment was conducted under greenhouse conditions at the Department of Soil Science of the Federal University of Lavras, in Lavras, Minas Gerais, Brazil. The pots were filled with 1 dm^3 of soil characterized as dystrophic Red Latosol with clayey texture (Santos et al., 2018). The chemical and granulometric analyses of the soil were performed according to the methodologies described by Teixeira et al. (2017), and the data are presented in Table 1. The soil Se content was determined by method 3051A according to the United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (U.S. EPA 2007). The Se content in the extracts was analyzed by atomic absorption spectrometry in a graphite furnace (AAnalyst™ 800 AAS, Perkin Elmer).

Table 1. Granulometric and chemical characterization of the soil.

Property	Unit	Quantity	Method/Extractor
pH	-	4.60	Water (25:1)
Al	cmol _c dm ⁻³	0.30	KCl (1 mol L ⁻¹)
H + Al	cmol _c dm ⁻³	6.20	SMP
M.O	g kg ⁻¹	26.70	Na ₂ Cr ₂ O ₇ (4 N) + H ₂ SO ₄ (10 N)
P	mg dm ⁻³	0.10	Mehlich ⁻¹
K	cmol _c dm ⁻³	0.05	Mehlich ⁻¹
Ca	cmol _c dm ⁻³	0.39	KCl (1 mol L ⁻¹)
Mg	cmol _c dm ⁻³	0.14	KCl (1 mol L ⁻¹)
S	mg dm ⁻³	2.30	Ca ₃ (PO ₄) ₂ + CH ₃ COOH
B	mg dm ⁻³	0.04	Hot water
Cu	mg dm ⁻³	1.64	Mehlich ⁻¹
Fe	mg dm ⁻³	30.10	Mehlich ⁻¹
Mn	mg dm ⁻³	2.00	Mehlich ⁻¹
Zn	mg dm ⁻³	0.70	Mehlich ⁻¹
Se	ppm	< LOD*	3051A
Clay	g kg ⁻¹	670	Hydrometer
Silt	g kg ⁻¹	130	Hydrometer
Sand	g kg ⁻¹	200	Hydrometer

*Below the detection limit (< 8 ppb).

Based on the soil chemical analysis, soil correction was performed to raise the base saturation to 80%, using 2.42 g dm⁻³ of calcium carbonate (for analysis) and magnesium carbonate (for analysis) in a 4:1 ratio. The soil was incubated with moisture at 60% of the total pore volume for 30 days. After this period, basic fertilization was applied with 30 mg of N (NH₄NO₃ and (NH₄)₂SO₄, which also provided 20 mg of S), 185 mg of P (triple superphosphate - 46% P₂O₅ and 13% Ca), and 90 mg of K (KCl) per dm³ of soil. Basic micronutrient fertilization consisted of 0.25 mg of Cu (CuCl), 1.25 mg of B (H₃BO₃), and 1.5 mg of Mn ((MnCl₂)·4H₂O) per dm³ of soil.

Tomato seeds were germinated in trays containing expanded vermiculite. Ten days after germination, when they had two fully expanded true leaves, the seedlings were transplanted into pots. During cultivation, top-dressing fertilization was applied at doses of 200 mg of N and 200 mg of K per dm³ of soil, using urea (CO(NH₂)₂) and potassium chloride (KCl), respectively. Top-dressing fertilization was performed at 30, 40, 50, and 60 DAT. The soil remained at 60% field capacity, adding the evapotranspired volume with distilled water. During the experiment, the average temperature inside the greenhouse was 23 ± 7°C and the average relative humidity was 67%, using the HOBO UX100-003 Temp/RH device.

Sixty days after sowing, began the harvesting of fruits with full and uniform red coloration. Collection was performed every 4 days over a 40-day period. The fruits were

evaluated for physical and production parameters and subsequently stored in a freezer at -20°C for further analysis. At 90 DAT, the plants were cut at soil level and separated into shoots (stem and leaves), fruits and roots. The different plant organs were washed in running water, hydrochloric acid solution (0.3%, v/v), and distilled water (Barreto et al., 2021).

2.3 Plant biomass and physical characterization

The partitioning of the plant (root, shoot and fruit) was performed by placing the samples separately in a forced-air circulation oven at 50°C until they reached a constant weight. Subsequently, they were weighed on a precision balance (0.001 g) to determine the dry mass of roots, shoots, and fruits, with the results expressed in g per plant. Based on the dry and fresh mass of the fruits, the moisture content (%) was calculated. The evaluated production components were the number of fruits per plant, fruit mass (g fruit^{-1}), and yield (g plant^{-1}). Additionally, the diameter (mm) and length of the fruits (mm) were measured. Mass parameters were determined using a precision balance (0.001 g), and diameter and length were measured using a digital caliper (MTX) with a precision of ± 0.02 mm.

2.4 Element concentrations

The dry plant materials (shoots and fruits) were milled in a Wiley mill (40-mesh sieve) and subjected to chemical analysis to determine the levels of macronutrients (N, P, K, Ca, Mg, and S), micronutrients (Cu, Fe, Mn, and Zn), and Se. The macro and micronutrients were analyzed according to Malavolta et al. (1997). The N content was determined by the Kjeldahl method (Silva, 2009), and the Se content was determined according to Cardoso et al. (2022). The contents of macronutrients, micronutrients, and Se were determined by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES), with the results expressed in g kg^{-1} DM for macronutrients and mg kg^{-1} DM for micronutrients and Se. The accumulation of Se and Zn was calculated by multiplying the Se and Zn content by the dry mass of each plant part (shoots and fruits), with the results expressed in μg per plant.

2.5 Statistical analysis

Initially, the data were subjected to analysis of normality (Shapiro-Wilk test) and verification of variance homogeneity (Bartlett test). Then, the analysis of variance was performed using the F-test, and when significant, the means were compared by the Scott-Knott test. Pearson's correlation was used to analyze the relations between the studied variables. All

statistical analyses were performed at a 5% significance level using R software version 4.2.1 (R Core Team, 2020).

3 Results

3.1 Plant biomass and physical characterization

The supply of Se affected the tomato plant growth. However, the same effect was not observed in plants grown under increasing doses of Zn (Fig. 1a). The dry mass of the shoots increased by 11.07% and 5.28% with the application of 50 and 100 $\mu\text{g dm}^{-3}$ of Se, respectively, compared to the control. Nevertheless, there was a reduction of 17.23% and 26.01% in the dry mass of fruits with the addition of 100 and 200 $\mu\text{g dm}^{-3}$ of Se, respectively. Regarding root dry mass, there was an increase of 20.83% with the addition of 50 $\mu\text{g dm}^{-3}$ of Se, while the application of 200 $\mu\text{g dm}^{-3}$ of Se reduced it by 26.32% compared to the treatment without Se (Fig. 1b). Zn doses did not affect the dry mass of the shoots and fruits, with averages of 2.58 ± 0.16 and $3.02 \pm 0.12 \text{ g plant}^{-1}$, respectively. However, there was a 20.83% increase in root dry mass with the application of 8 and 16 mg dm^{-3} of Zn (Fig. 1c).

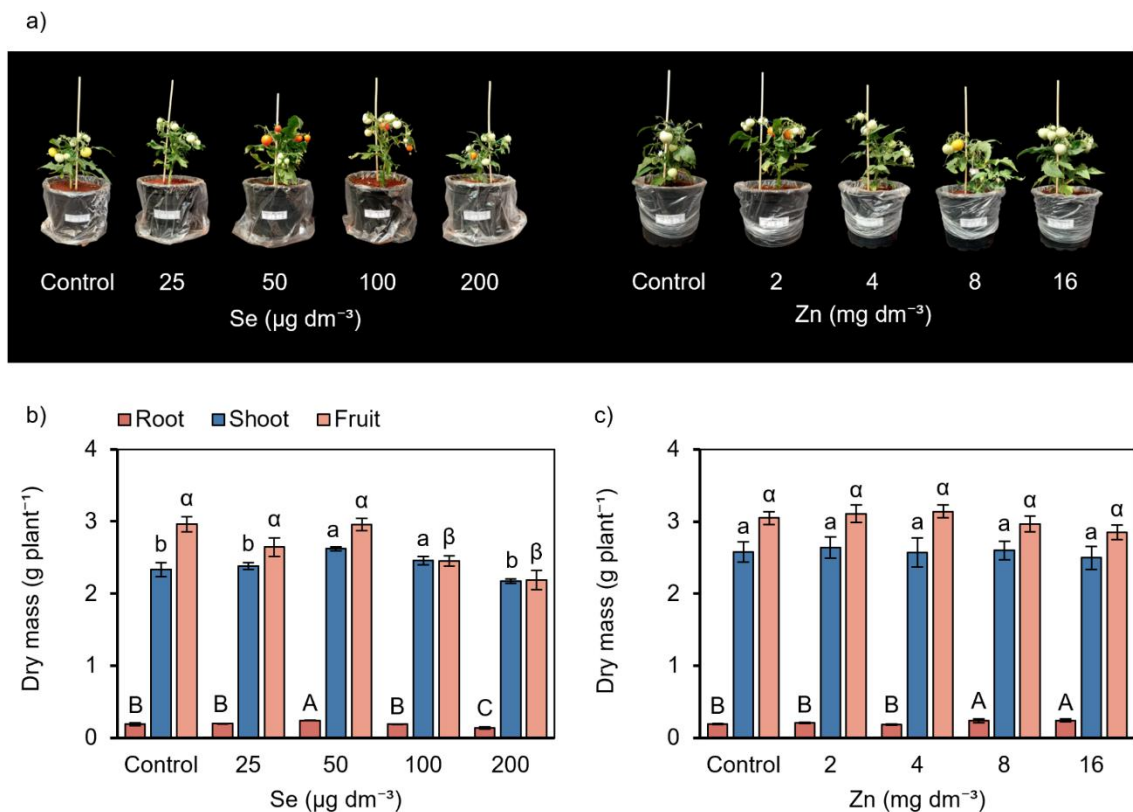


Figure 1. Tomato plants under different doses of Se and Zn (a); Root dry mass, shoot dry mass and fruit dry mass as a function of Se (b) and Zn (c) doses. Columns with different letters differ by the Scott-Knott test ($n = 4$, $p \leq 0.05$). The bars show means and vertical error bars refer to the standard errors.

The supply of Se did not affect the number of fruits per plant and the diameter of the fruits, with average values of 17 ± 1.00 and 16.45 ± 0.05 mm, respectively (Table 2). However, plants cultivated with the addition of 100 and 200 $\mu\text{g dm}^{-3}$ of Se exhibited a reduction of 29.03% and 28.71% in fruit mass, 25.71% and 29.40% in yield, and 4.86% and 8.28% in fruit length, respectively, compared to the control (Table 2). Regarding Zn, there was no effect of the doses on the number of fruits per plant (17 ± 2.00), fruit mass (3.36 ± 0.34 g fruit⁻¹), yield (54.43 ± 2.31 g plant⁻¹), and fruit length (15.58 ± 0.04 mm). On the other hand, there was an increase of 7.65% and 12.29% in fruit diameter with the addition of 4 and 8 mg dm⁻³ of Zn, respectively (Table 2).

Table 2. Means of production components of mini-tomatoes.

Doses	Fruit number	Fruit mass	Yield	Length	Diameter
Se	ns	*	**	*	ns
Control	17 ± 1.47 a	3.10 ± 0.27 a	52.35 ± 1.89 a	16.06 ± 0.03 a	16.72 ± 0.04 a
25	17 ± 0.35 a	2.74 ± 0.16 a	46.42 ± 2.25 a	16.53 ± 0.06 a	16.39 ± 0.04 a
50	17 ± 1.27 a	3.04 ± 0.31 a	50.26 ± 1.47 a	15.77 ± 0.09 a	16.73 ± 0.05 a
100	18 ± 0.54 a	2.20 ± 0.12 b	38.89 ± 1.12 b	15.28 ± 0.08 b	16.79 ± 0.05 a
200	17 ± 1.24 a	2.21 ± 0.32 b	36.96 ± 2.25 b	14.73 ± 0.04 b	15.61 ± 0.02 a
CV	14.38	18.71	9.49	4.69	5.58
Zn	ns	ns	ns	ns	*
Control	16 ± 2.56 a	3.67 ± 0.56 a	55.45 ± 1.68 a	15.87 ± 0.02 a	15.74 ± 0.05 b
2	18 ± 2.38 a	3.17 ± 0.37 a	54.75 ± 2.20 a	14.73 ± 0.04 a	16.02 ± 0.05 b
4	18 ± 1.47 a	3.29 ± 0.24 a	58.30 ± 1.64 a	15.92 ± 0.02 a	17.04 ± 0.03 a
8	14 ± 0.41 a	3.75 ± 0.05 a	52.56 ± 1.91 a	15.80 ± 0.05 a	17.87 ± 0.02 a
16	18 ± 0.63 a	2.90 ± 0.23 a	51.07 ± 1.98 a	15.59 ± 0.03 a	15.97 ± 0.03 b
CV	22.76	20.05	8.05	5.40	5.71

Columns with different letters differ by the Scott-Knott test ($n = 4$, $p \leq 0.05$). Se ($\mu\text{g dm}^{-3}$); Zn (mg dm⁻³); Fruit number (per plant); Fruit mass (g fruit⁻¹); Yield (g plant⁻¹); Length (mm); Diameter (mm); Not significant by the F-test (ns); Significant by the F-test at $P \leq 0.05$ (*) and $P \leq 0.01$ (**); CV (%; Coefficient of Variation). Values are average $\pm$ standard error.

3.2 Element concentrations

3.2.1 Effect of Se and Zn on plant nutrition and fruit biofortification

In general, there was an increase in the content of Se and Zn in the shoots of the tomato plant with increasing doses of these elements (Fig. 2 a and b). However, the fruits showed higher content and accumulation only at doses above 100 $\mu\text{g dm}^{-3}$ of Se (Fig. 2 a and b) and 16 mg dm⁻³ of Zn (Fig. 2 c and d). The doses of 100 and 200 $\mu\text{g dm}^{-3}$ of Se increased, respectively, by 79.12% and 91.90% the content, and by 77.33% and 90.12% the accumulation of Se in the

fruits, compared to the addition of $25 \mu\text{g dm}^{-3}$ of Se. Regarding the Zn doses, the addition of 16 mg dm^{-3} of Zn increased by 81.71% and 38.44% the content and accumulation of Zn in the shoots, and by 81.22% and 34.15% the content and accumulation in the fruits, respectively, compared to the control treatment.

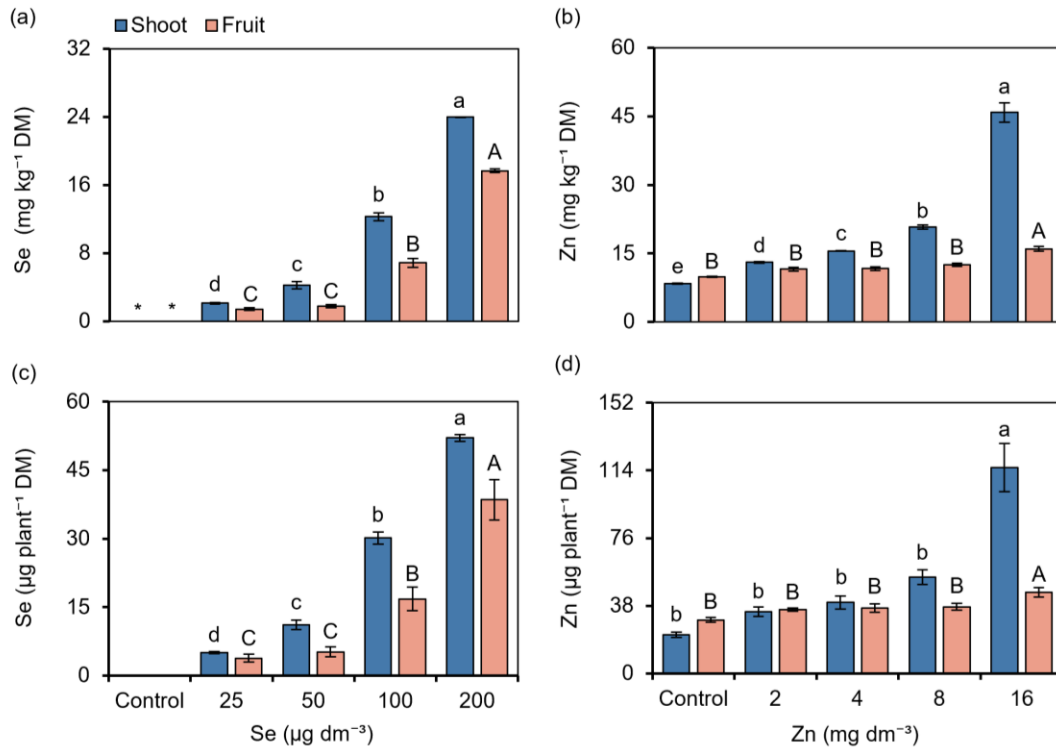


Figure 2. Se (a) and Zn (b) concentrations in shoots and fruits. Accumulation of Se (c) and Zn (d) in shoots and fruits. Columns with different letters differ by the Scott-Knott test ($n = 4$, $p \leq 0.05$). The bars show means and vertical error bars refer to the standard errors. *Below detection limit ($<0.014 \text{ mg L}^{-1}$).

3.2.2 Concentration of nutrients in plants treated with selenium

Regarding macronutrients, the supply of $100 \mu\text{g dm}^{-3}$ of Se promoted an increase of 32.70% in N content in the shoot (Fig. 3 a). However, there was no effect of Se on N and Ca content in the fruits, with average contents of $21.45 \pm 0.98 \text{ g kg}^{-1}$ and $2.49 \pm 0.18 \text{ g kg}^{-1}$, respectively (Fig. 3 a and d). The addition of $25 \mu\text{g dm}^{-3}$ of Se increased by 25.35% the P content in the shoot. On the other hand, in the fruits, there was an increase of 17.01% and 7.01% in the P and Ca content, respectively, with the addition of $50 \mu\text{g dm}^{-3}$ of Se. While the dose of $100 \mu\text{g dm}^{-3}$ of Se reduced by 5.75% and 10.13% the content of these elements in the fruits (Fig. 3 b and d). No changes were observed in the K and Mg content both in the shoot and in fruits of the plants treated with Se, when compared to the control (Fig. 3 c and e). The supply of $25 \mu\text{g dm}^{-3}$ of Se increased by 37.22% the S content in the shoot, while in the fruit the highest

content of the element ($2.45 \pm 0.03 \text{ g kg}^{-1} \text{ DM}$) was obtained with the addition of $50 \mu\text{g dm}^{-3}$ of Se, corresponding to an increase of 13.26%, compared to the treatment without Se (Fig. 3 f).

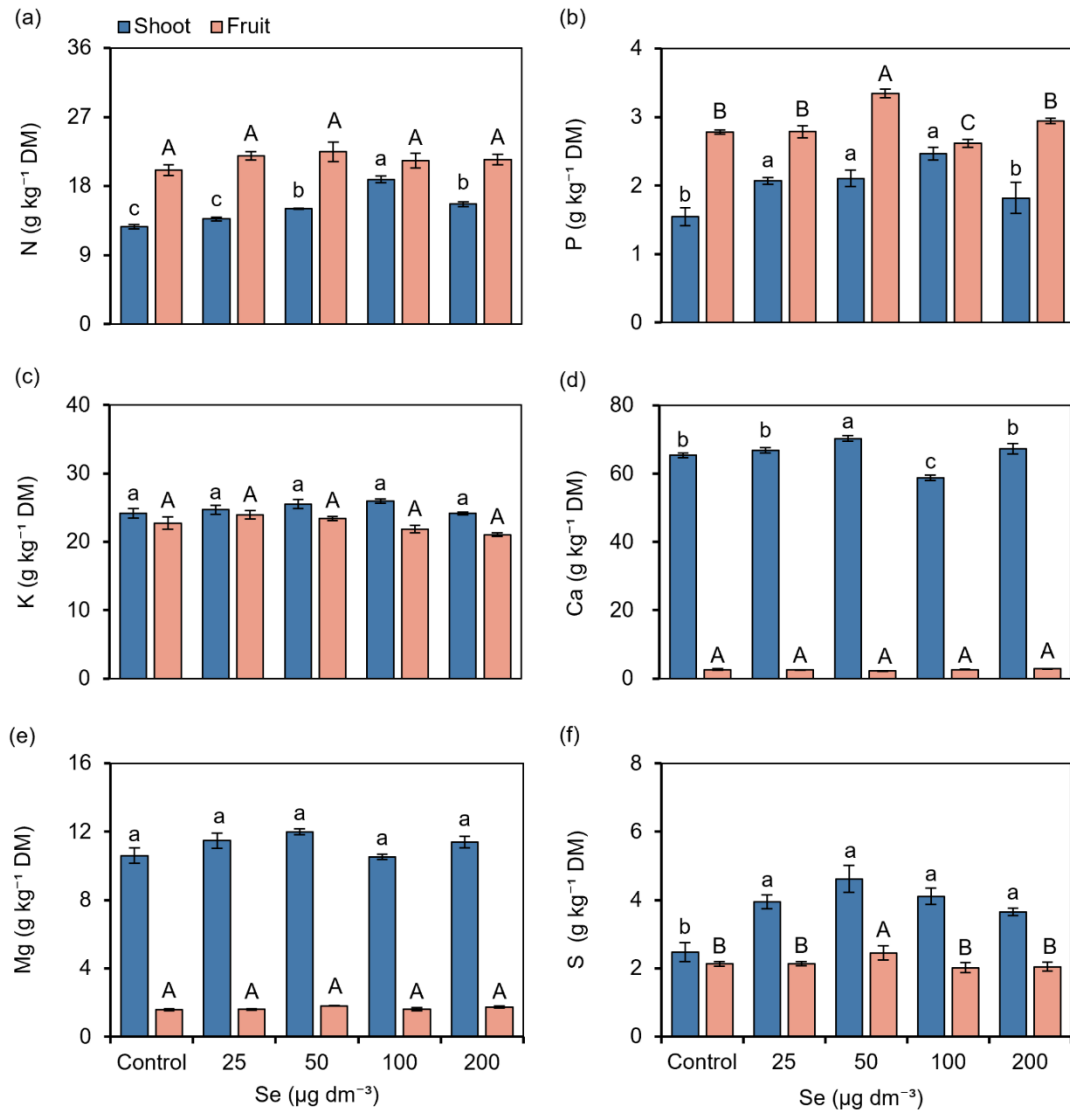


Figure 3. Macronutrients content (N, P, K, Ca, Mg and S) in shoots and fruits. Columns with different letters differ by the Scott-Knott test ($n = 4$, $p \leq 0.05$). The bars show means and vertical error bars refer to the standard errors ($n = 4$).

Regarding micronutrients, Se did not affect the Cu content in the shoot ($7.50 \pm 0.42 \text{ mg kg}^{-1} \text{ DM}$) and fruits ($3.27 \pm 0.18 \text{ mg kg}^{-1} \text{ DM}$) and Zn ($12.77 \pm 0.40 \text{ mg kg}^{-1} \text{ DM}$) in the shoot of the tomato plant (Fig. 4 a and c). The addition of $50 \mu\text{g dm}^{-3}$ of Se increased by 14.79% the Fe content in the shoot, while in the fruits it increased by 16.10% and 16.92% the content of Zn and Mn, respectively. On the other hand, in the shoot, there was an increase of 22.79% in the Mn content with the addition of $200 \mu\text{g dm}^{-3}$ of Se (Fig. 4 d).

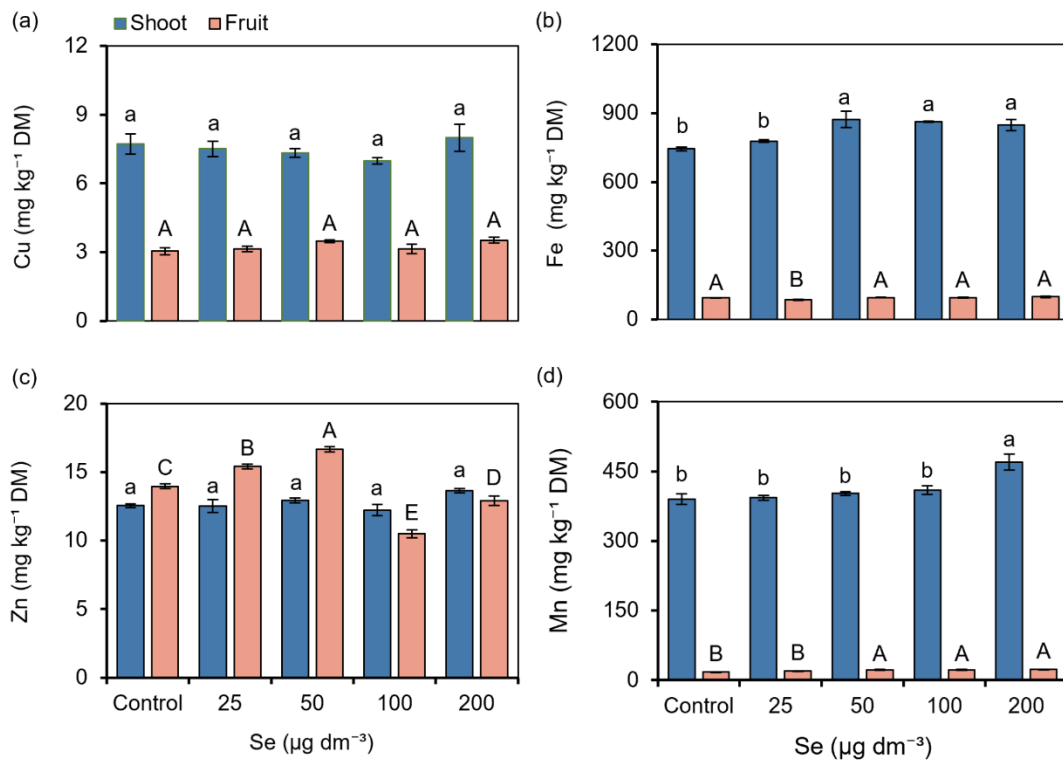


Figure 4. Micronutrients content (Cu, Fe, Zn and Mn) in shoots and fruits. Columns with different letters differ by the Scott-Knott test ($n = 4$, $p \leq 0.05$). The bars show means and vertical error bars refer to the standard errors ($n = 4$).

Pearson's correlation (Fig. 5) of the studied variables with the application of doses of Se showed that Se is associated with the other variables. There was a high correlation, significant ($p \leq 0.01$), and positive between the accumulation of Se both in the shoot and in the fruits, and the following variables: Se content and accumulation in the shoot and fruit, Mn content in the shoot and fruit, and Fe content in the fruit. On the other hand, there was a high correlation, significant ($p \leq 0.01$), and negative between Se accumulation in the shoot and fruits and dry fruit mass, fruit mass, length, yield, and K and Zn content in the fruits.

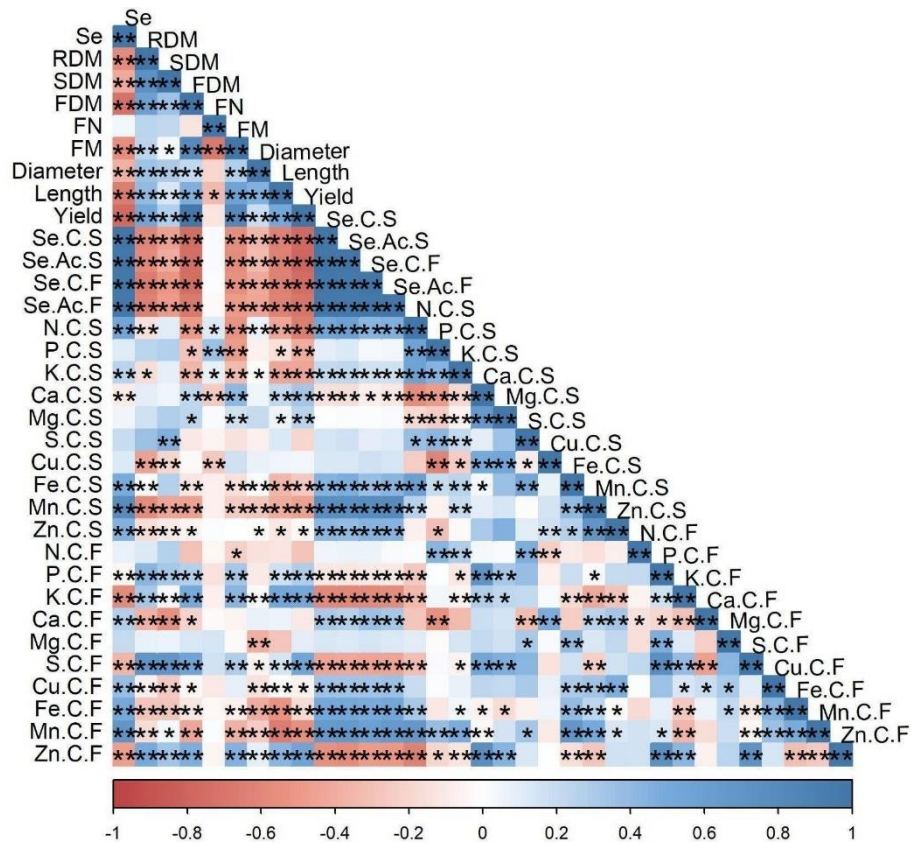


Figure 5. Heatmap showing Pearson's simple correlation, with the significance of the correlation identified with * and ** corresponding to significant by the F-test at $p \leq 0.01$ and F-test at $p \leq 0.05$, respectively. Abbreviations: root dry mass (RDM), shoot dry mass (SDM) and fruit dry mass (FDM); fruit number (FN) and fruit mass (FM); Se content in the shoot (Se.C.S) and fruit (Se.C.F), Se accumulation in the shoot (Se.Ac.S) and fruit (Se.Ac.F); N (N.C.S), P (P.C.S), K (K.C.S), Ca (Ca.C.S), Mg (Mg.C.S), S (S.C.S), Cu (Cu.C.S), Fe (Fe.C.S), Mn (Mn.C.S) and Zn (Zn.C.S) content in the shoot; N (N.C.F), P (P.C.F), K (K.C.F), Ca (Ca.C.F), Mg (Mg.C.F), S (S.C.F), Cu (Cu.C.F), Fe (Fe.C.F), Mn (Mn.C.F) and Zn (Zn.C.F) content in the fruit.

3.2.3 Concentration of nutrients in plants treated with zinc

Regarding macronutrient levels, Zn supply did not affect N content in the shoot and fruits (Fig. 6 a), with average contents of $14.55 \pm 1.01 \text{ mg kg}^{-1} \text{ DM}$ and $21.95 \pm 0.92 \text{ mg kg}^{-1} \text{ DM}$, respectively. Regarding P content, there was a tendency of reduction in the shoot at doses higher than 4 mg dm^{-3} of Zn (Fig. 6 b). K showed higher content in the shoot ($57.95 \pm 1.11 \text{ mg kg}^{-1} \text{ DM}$) with the supply of 2 mg dm^{-3} of Zn, corresponding to an increase of 23.76% compared to the control treatment (Fig. 6 c). On the other hand, there was a tendency of reduction in Ca content in the shoot with the addition of doses higher than 4 mg dm^{-3} of Zn. However, no significant difference was observed in Ca content in the fruits, with an average content of $2.85 \pm 0.20 \text{ mg kg}^{-1} \text{ DM}$ (Fig. 6 d). The addition of 4 mg dm^{-3} of Zn increased by 15.84% the Mg

content in the shoot compared to the control treatment. However, there was a tendency of reduction in the nutrient content in the fruits at doses higher than 8 mg dm^{-3} of Zn (Fig. 6 e). Regarding S, the supply of 8 mg dm^{-3} of Zn increased by 33.65% the S content in the shoot, but had no effect on the nutrient content in the fruits (Fig. 6 f).

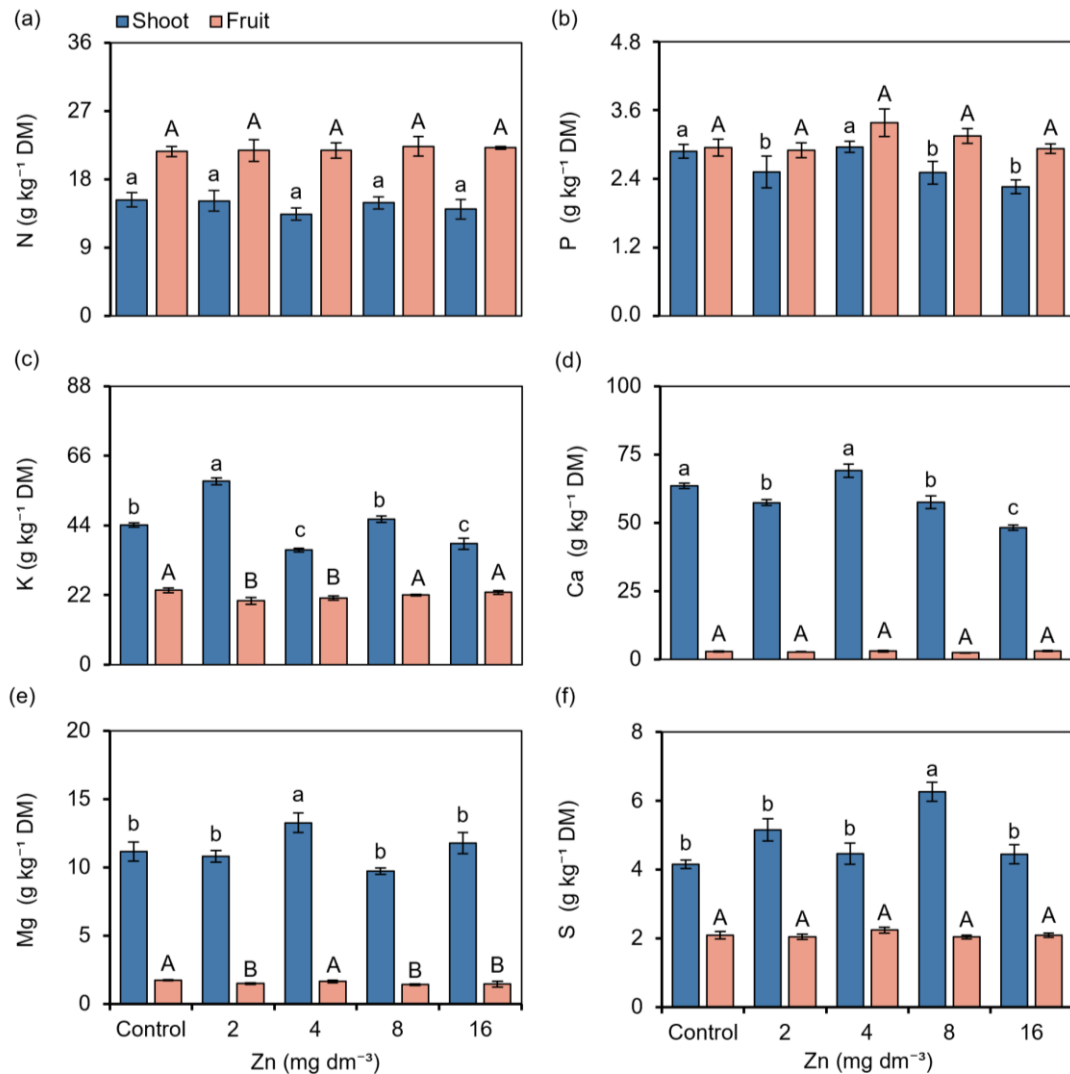


Figure 6. Macronutrients content (N, P, K, Ca, Mg and S) in shoots and fruits. Columns with different letters differ by the Scott-Knott test ($n = 4$, $p \leq 0.05$). The bars show means and vertical error bars refer to the standard errors ($n = 4$).

As for micronutrients, the supply of 4 mg dm^{-3} of Zn reduced by 31.54% the Cu content in the aerial part of the plants. However, it increased by 29.16% the nutrient content in the fruits (Fig. 7 a). Regarding Fe, there was a reduction in content in the aerial part and fruits as increasing doses of Zn were added to the soil (Fig. 7 b). On the other hand, no effect was observed on the content and accumulation of Mn in the shoot, with average values of $367.27 \pm$

28.91 mg kg⁻¹ DM. However, there was a tendency of reduction in Mn content in the fruits (Fig. 7 c).

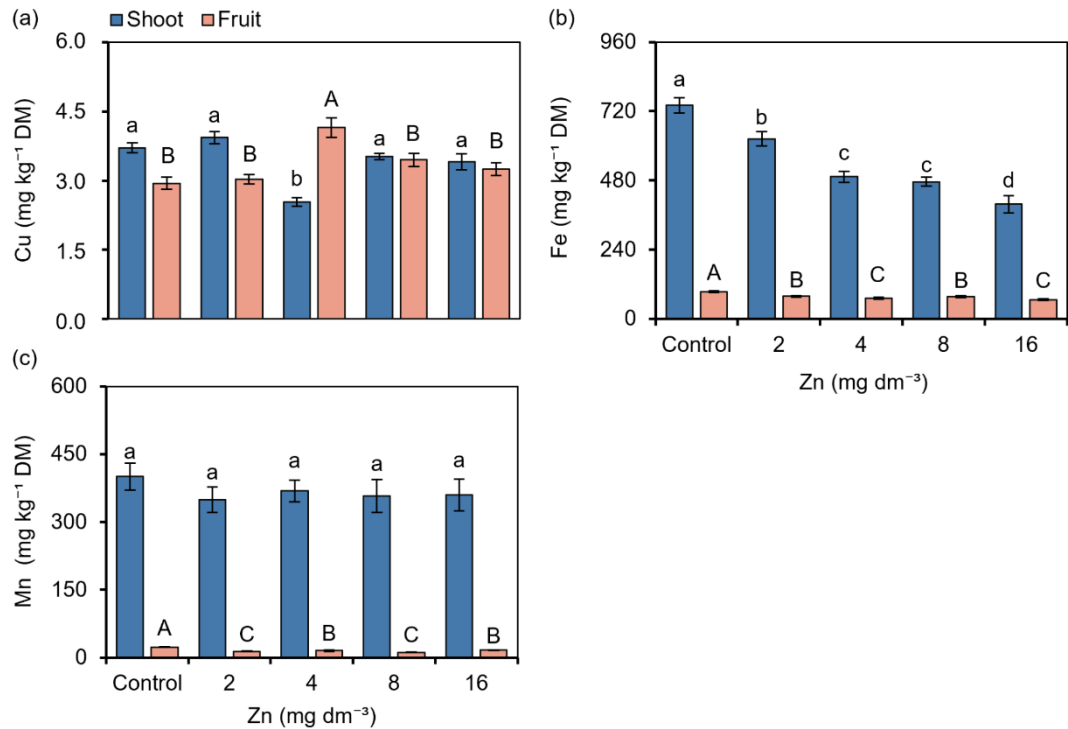


Figure 7. Micronutrients content (Cu, Fe and Mn) in shoots and fruits. Means followed by the same letter do not differ by the Scott-Knott test ($P \leq 0.05$). The bars show means and vertical error bars refer to the standard errors ($n = 4$).

Regarding Pearson's correlation (Fig. 8), there was a high correlation, significant ($p \leq 0.01$), and positive only between the Zn content and accumulation, both in the aerial part and in the fruits. On the other hand, a high correlation, significant ($p \leq 0.01$), and negative was observed between Zn accumulation both in the aerial part and in the fruits and the following variables: P, Ca, and Fe content in the aerial part and Fe content in the fruits.

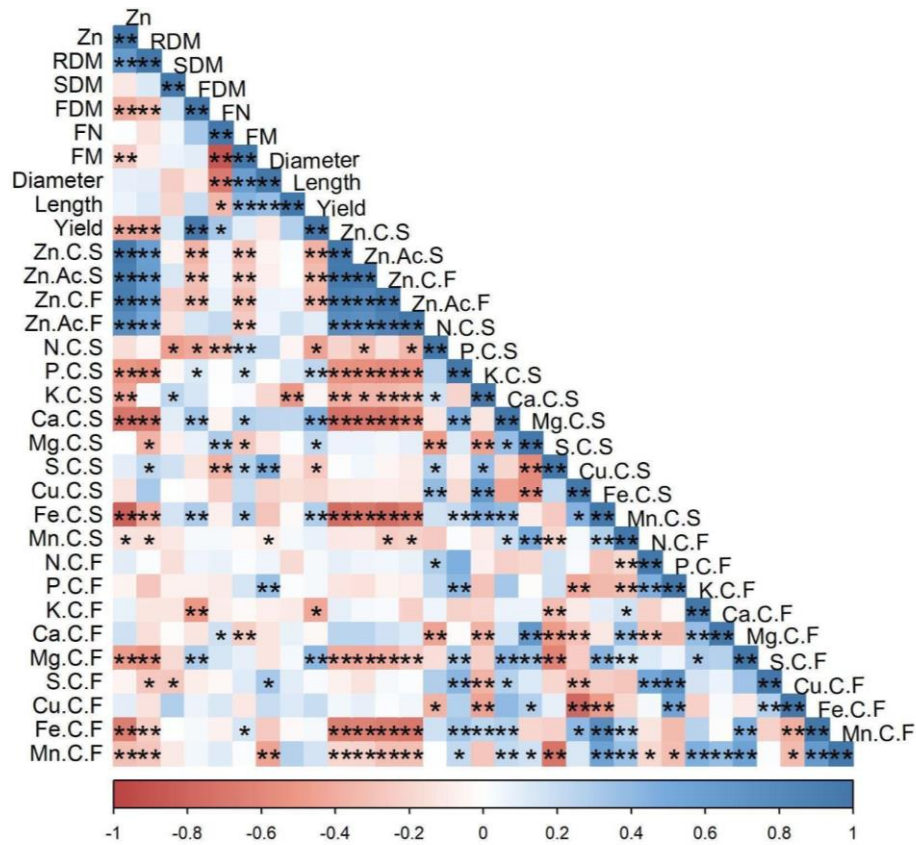


Figure 8. Heatmap showing Pearson's simple correlation, with the significance of the correlation identified with * and ** corresponding to significant by the F-test at $p \leq 0.01$ and F-test at $p \leq 0.05$, respectively. Abbreviations: root dry mass (RDM), shoot dry mass (SDM) and fruit dry mass (FDM); fruit number (FN) and fruit mass (FM); Zn content in the shoot (Zn.C.S) and fruit (Zn.C.F), Zn accumulation in the shoot (Zn.Ac.S) and fruit (Zn.Ac.F); N (N.C.S), P (P.C.S), K (K.C.S), Ca (Ca.C.S), Mg (Mg.C.S), S (S.C.S), Cu (Cu.C.S), Fe (Fe.C.S) and Mn (Mn.C.S) content in the shoot; N (N.C.F), P (P.C.F), K (K.C.F), Ca (Ca.C.F), Mg (Mg.C.F), S (S.C.F), Cu (Cu.C.F), Fe (Fe.C.F) and Mn (Mn.C.F) content in the fruit.

4 Discussion

4.1 Effect of selenium on tomato plants

Selenium (Se) is essential for both animals and humans, with plants being the primary source of this nutrient (Schiavon et al., 2020; Ferro et al., 2021). For plants, optimal amounts of Se promote growth and increase stress tolerance (Moulick et al., 2024). In our study, higher doses of Se resulted in greater content and accumulation of the element in the aerial part and fruits. However, these doses negatively impacted plant growth and fruit production. This phytotoxic effect may have occurred due to changes in the synthesis, structure, and function of proteins, as a result of the substitution of S with Se in S-amino acids such as cysteine (Cys) and methionine (Met) and their corresponding proteins (Zhang and Chu, 2022). Additionally, when

Se assimilation is elevated, an imbalance between antioxidant compounds and reactive oxygen species (ROS) can occur, leading to oxidative stress, which can affect various physiological processes (Ikram et al., 2024).

Similarly, reduced plant growth was observed with higher Se doses in rice (Gouveia et al., 2020) and *Arabidopsis thaliana* (Ribeiro et al., 2016). In wheat, Boldrin et al., 2016 observed greater growth in plants cultivated under low Se concentrations, and no effect was observed in cowpea (Silva et al., 2023). Therefore, the amount of Se applied for biofortification purposes should consider the species used, thus avoiding potential toxic effects of the element and consequently reducing crop growth and yield.

Regarding elemental composition, the results showed that Se supply via soil increased the content of this element in tomato. Furthermore, at lower doses (25 and 50 $\mu\text{g dm}^{-3}$ of Se), the Se content did not exceed the maximum allowable value for human and animal consumption (4 mg kg^{-1} DM) (Dhillon et al., 2019), therefore presenting as a promising alternative to mitigate widespread Se malnutrition in the population. Considering the average moisture content of the fruits (94%), the minimum daily intake recommended for adult humans (50 μg of Se) the consumption of 100 g of fresh fruits from plants cultivated with the addition of 25 $\mu\text{g dm}^{-3}$ of Se ($1.43 \pm 0.13 \text{ mg kg}^{-1}$ DM) could meet 17.16% of the daily intake requirement for Se. It is worth noting that plants not receiving Se did not show quantifiable content of the element in the fruits according to the methodology used.

Positive results were obtained with the supply of low Se concentrations in tomato plant cultivated in nutrient solution (Preciado-Rangel et al., 2021; Gaucin-Delgado et al., 2020), substrates (Sabatino et al., 2021; Rahin et al., 2020), and even when applied via foliar application (Zhu et al., 2018). Therefore, it can be inferred that it is possible to increase Se content in agricultural crops in a fast, practical, and efficient way by including the element in fertilization programs.

As for macronutrient content, Se positively influenced the N content in the aerial part. However, there are studies with tomato plants where no effect of Se on N content was observed (Rahim et al., 2020), as well as in radish (da Silva et al., 2020; Cipriano et al., 2022). In potatoes, Se addition reduced N content in leaves and tubers (de Oliveira et al., 2019). This effect of Se on N metabolism occurs due to the influence of Se on S metabolism (Schiavon et al., 2017; Zhou et al., 2020; Lei et al., 2022), since the absorption and assimilation of N by plants is coordinated with the absorption and assimilation of S (Hawkesford et al., 2012). Emphasizing that these interactions will vary depending on the species as well as the cultivar.

Similarly, Se supply increased S content in the aerial part of the tomato plant. Similar results were observed in spinach (Saeed et al., 2023), lettuce (Abdalla et al., 2022), radish (Schiavon et al., 2016), and broccoli (Hsu et al., 2010). On the other hand, some studies have shown an antagonistic effect between these elements, such as lower S content at higher Se concentrations in radish (Cipriano et al., 2022), cabbage (Wang et al., 2020), and onion (Kopsell and Randle, 1999), and reduced Se content with increasing S doses in strawberry (Santiago et al., 2018).

Some studies suggest that low Se concentrations can increase S absorption (Abdalla et al., 2022, Abdalla et al., 2020). This interaction between Se and S occurs due to the structural similarities between these elements, allowing selenate to use the same absorption and transport pathway as sulfate (White, 2018). Therefore, the presence of Se can affect the expression of key genes that encode transporters and enzymes regulating S metabolism (Boldrin et al., 2016; Cardoso et al., 2022), influencing plant growth and development.

The presence of low selenate concentrations in the soil solution favored P content in the shoot yet showed a contrasting effect between doses for P and Ca content in the fruits and in the aerial part, respectively. P is important for the synthesis of phospholipids and nucleic acids, as well as acting in the regulation of various enzymes (Lambers, 2022). Similar results were observed in lettuce (Abdalla et al., 2022) and radish (Cipriano et al., 2022), where the synergistic or antagonistic effect of Se on these nutrient content depends on the Se dose used. On the other side, Boldrin et al. (2013) observed no effect of Se application on P content in rice grains.

Regarding micronutrients, Se supply positively influenced Fe and Mn content in plants. Additionally, it increased Zn content in fruits at low concentrations. This result aligns with Huang et al. (2023), who reported that low Se concentrations promoted Zn enrichment in strawberries, which was inhibited by high doses of the element. Micronutrients, by acting as enzyme cofactors, are essential for the synthesis of metabolic compounds related to antioxidant metabolism (Tavanti et al., 2021; Assunção et al., 2022). Therefore, due to its antioxidant properties, Se can modulate the utilization of these cofactors, thereby interfering with their absorption.

For instance, in rice grains, Se application increased poorly soluble Fe, thus enhancing Fe availability in plant cells (Su et al., 2024). Furthermore, Se application reduces ROS and enhances the biosynthesis of superoxide dismutase (SOD), increasing Zn absorption by plants

(Georgiadou et al., 2018; Ulhassan et al., 2019). Similarly, Mn is essential for the synthesis of MnSOD, MnCAT, and RNA polymerases (Alejandro et al., 2020).

These results allow us to infer that Se interactions with plant nutrients are bidirectional, being antagonistic or synergistic depending on the dose used and the plant species. Therefore, analyzing the concentrations of essential elements in plants is crucial, as it affects not only the effectiveness of biofortification and the nutritional value of crops but also the nutritional balance of plants, as demonstrated in other studies (Drahoňovský et al., 2016).

4.2 Effect of zinc on tomato plants

Zinc (Zn) is essential for the survival of most organisms, including plants and animals (Gondal et al., 2021; Khan et al., 2022). However, approximately 50% of cultivated soils are considered Zn-deficient (Natasha et al., 2022; Ali et al., 2023), which interferes with plant growth and development. It also results in serious health problems due to the consumption of food from Zn-deficient soils (Hussain et al., 2022; Stiles et al., 2024). Therefore, Zn-enriched food can be an alternative to prevent this nutritional deficiency in humans (Bhatt et al., 2020; de Groot et al., 2021).

Our results showed that Zn did not affect plant growth and fruit production but increased the content and accumulation of the nutrient in the aerial part and, slightly, in the fruits. Considering the average moisture content of the fruits (94%), the minimum daily intake recommended for adult humans (11 mg of Zn), the consumption of 100 g of fresh fruits from plants cultivated with the addition of 16 mg dm⁻³ of Zn (16.00 ± 0.48 mg kg⁻¹ DM) could meet 0.87% of the daily intake requirement for Zn. Positive effects of Zn application on biofortification of edible parts have been reported in potatoes (Nagar et al., 2024), lettuce (de Almeida et al., 2020; de Lima et al., 2023), carrots (Buturi et al., 2023), beans (López-Morales et al., 2020), wheat (Chattha et al., 2017; Ramzan et al., 2020), and rice (Phattarakul et al., 2012). Therefore, Zn supply can contribute to increasing the nutrient content in food and reducing its deficiency in humans.

In tomato plant, Rabbi et al. (2023) found higher Zn absorption and fruit production with the supply of 5 kg ha⁻¹ of Zn (equivalent to 2.5 mg dm⁻³ of Zn) when applied 50% in the soil and 50% as foliar spraying during the seedling stage. However, in our study, only the dose of 16 mg dm⁻³ of Zn showed a significant increase in the nutrient content in the fruits. When supplied through the rhizosphere, Zn tends to accumulate in the order of roots > aerial part > fruits > seeds (White and Broadley, 2011), an indirect form of protection of the

photosynthetically active part from toxicity effects (Gupta et al., 2016). Therefore, additional work is needed to evaluate new nutritional management practices aiming at tomato Zn biofortification.

Regarding the influence of Zn on macronutrient content, our study indicated a negative correlation between Zn content and P and Ca content in the tomato plant, as well as a reduction in K content in the aerial part. Several studies have documented the antagonistic correlation between Zn and P in plants (Verma and Minhas, 1987; Bouain et al., 2014; Khan et al., 2014; Ova et al., 2015). Under P deficiency conditions, the activation of transcription of genes related to Zn homeostasis occurs, and *vice versa* (Xie et al., 2019; Kumar et al., 2021). In rice, Ding et al. (2021) showed that high Zn levels decreased biomass and rice production, inhibited P translocation and distribution from root to the aerial part, downregulating P transporter genes in the aerial part. Therefore, Zn nutrition can directly influence P absorption mechanisms in plants.

In *Mentha longifolia* L., Barzin et al. (2023) reported a reduction in N, P, K, and Ca content in plants grown hydroponically under Zn excess. However, although a reduction in K content in the aerial part was observed with doses above 2 mg dm⁻³ of Zn, synergistic effects of Zn and K have been reported in corn (Raza et al., 2021). Additionally, the antagonistic effect of P on Zn was reduced by increased K levels in wheat (Naeem et al., 2018). Conversely, Ramzan et al. (2020) observed an increase in Ca and Mg content in wheat grains, regardless of the Zn application method. Ca, along with Zn, is essential for maintaining cellular membrane integrity (Frossard et al., 2000).

Regarding micronutrients, our study showed a negative correlation between Zn and Fe content both in the aerial part and in the fruits. A reduction in Mn content in the fruits was also observed. Similarly, Barzin et al. (2023) and Huang et al. (2023) reported a reduction in Mn and Fe content due to Zn addition in *Mentha longifolia* L. plants and in strawberry, respectively. Since Zn shares a chemical similarity with Fe and competes for distribution (Fariduddin et al., 2022), excess Zn can replace Fe at binding sites such as phytosiderophores and transporter proteins like *IRT1*, thereby interfering with Fe-related metabolism (Vert et al., 2002; Li et al., 2013; Fan et al., 2021).

Moreover, various membrane transporters responsible for Zn absorption and transport are involved in the absorption, transport, storage, and redistribution of other micronutrients such as Cu²⁺, Fe²⁺, and Mn²⁺ (Krishna et al., 2022). In our study, although Zn reduced Fe content in the tomato plant, no visible deficiency symptoms were observed, which can be attributed to the

high Fe content in the aerial part of the plants. Fe, as well as Zn, is essential for nearly all living organisms and is involved in numerous important physiological processes in plants, including chlorophyll synthesis, cellular respiration, and enzyme composition and activation (Ning et al., 2023).

Although no effect was observed on plant growth and development, our results showed that high Zn concentrations affect nutrient absorption and distribution in plants. Thus, studying Zn interaction with other nutrients is relevant not only for agriculture but also for global food security (Gupta et al., 2016; Sheoran et al., 2022). Therefore, these results are important for developing more effective strategies to increase crop yield and improve food nutritional quality through plant biofortification.

5 Conclusions

Consuming 100 g of fresh fruits from plants cultivated with the addition of $25 \mu\text{g dm}^{-3}$ of Se and 16 mg dm^{-3} of Zn supplies 17.16% and 0.87% of the daily intake requirement for Se and Zn, respectively, without harming fruit production.

Our results showed that tomato can be biofortified with Se as long as this element is supplied at low concentrations ($25 \mu\text{g dm}^{-3}$ of Se), contributing to adequate Se intake without reducing fruit production.

Regarding Zn, our study suggests that new approaches should be studied to increase the nutrient content in fruits, such as dose diversification, different genotypes, application methods, and nutrient sources.

More detailed studies are needed to understand the effect of Se and Zn interaction on the content of macro and micronutrients in plants, especially considering the tomato plant biofortification with these elements.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Brazilian Coordination for Improvement of Higher Level Personnel (CAPES), Brazilian Council of Scientific and Technological Development (CNPq), and Minas Gerais State Research Support Foundation (FAPEMIG).

References

- Abdalla, M. A., Lentz, C., & Mühling, K. H. (2022). Crosstalk between selenium and sulfur is associated with changes in primary metabolism in lettuce plants grown under Se and S enrichment. *Plants*, 11(7), 927. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11070927>
- Abdalla, M. A., Sulieman, S., & Mühling, K. H. (2020). Regulation of selenium/sulfur interactions to enhance chemopreventive effects: lessons to learn from Brassicaceae. *Molecules*, 25(24), 5846. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES25245846>
- Alejandro, S., Höller, S., Meier, B., & Peiter, E. (2020). Manganese in plants: from acquisition to subcellular allocation. *Front. Plant Sci.*, 11, 517877. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.00300/BIBTEX>
- Ali, M., Ahmed, I., Tariq, H., Abbas, S., Zia, M. H., Mumtaz, A., & Sharif, M. (2023). Growth improvement of wheat (*Triticum aestivum*) and zinc biofortification using potent zinc-solubilizing bacteria. *Front. Plant Sci.*, 14, 1140454. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1140454/BIBTEX>
- Assunção, A. G. L., Cakmak, I., Clemens, S., González-Guerrero, M., Nawrocki, A., & Thomine, S. (2022). Micronutrient homeostasis in plants for more sustainable agriculture and healthier human nutrition. *J. Exp. Bot.*, 73(6), 1789–1799. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERAC014>
- Avnee, Sood, S., Chaudhary, D. R., Jhorar, P., & Rana, R. S. (2023). Biofortification: an approach to eradicate micronutrient deficiency. *Front. nutr.*, 10, 1233070. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1233070>
- Barreto, R. F., dos Santos, L. C. N., de Mello Prado, R., Campos, C. N. S., da Silva Júnior, G. B., Barreto, C. F., Teodoro, P. E., & Carvalho, R. F. (2021). Response of photomorphogenic tomato mutants to nutrient omissions. *Acta Physiol Plant.*, 43(7), 1–10. <https://doi.org/10.1007/S11738-021-03274-6/FIGURES/6>
- Barzin, G., Azadnafs, N., & Bishehkolaei, R. (2023). Effect of calcium on improving zinc tolerance in hydroponically grown *Mentha longifolia* L. through modulation of metabolic pathways and ion homeostasis. *Revista Brasil. Bot.*, 1–13. <https://doi.org/10.1007/S40415-023-00956-Y/TABLES/2>
- Bhardwaj, A. K., Chejara, S., Malik, K., Kumar, R., Kumar, A., & Yadav, R. K. (2022). Agronomic biofortification of food crops: An emerging opportunity for global food and nutritional security. *Front. Plant Sci.*, 13, 1055278. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1055278>
- Bhatt, R., Hossain, A., & Sharma, P. (2020). Zinc biofortification as an innovative technology to alleviate the zinc deficiency in human health: A review. *Open Agric.*, 5(1), 176–186. <https://doi.org/10.1515/opag-2020-0018>
- Boldrin, P. F., de Figueiredo, M. A., Yang, Y., Luo, H., Giri, S., Hart, J. J., Faquin, V., Guilherme, L. R. G., Thannhauser, T. W., & Li, L. (2016). Selenium promotes sulfur accumulation and plant growth in wheat (*Triticum aestivum*). *Physiol. Plant.*, 158(1), 80–91. <https://doi.org/10.1111/PPL.12465>

Boldrin, P. F., Faquin, V., Ramos, S. J., Boldrin, K. V. F., Ávila, F. W., & Guilherme, L. R. G. (2013). Soil and foliar application of selenium in rice biofortification. *J. Food Compos. Anal.*, 31(2), 238–244. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2013.06.002>

Bouain, N., Kisko, M., Rouached, A., Dauzat, M., Lacombe, B., Belgaroui, N., Ghnaya, T., Davidian, J. C., Berthomieu, P., Abdelly, C., & Rouached, H. (2014). Phosphate/zinc interaction analysis in two lettuce varieties reveals contrasting effects on biomass, photosynthesis, and dynamics of Pi transport. *Biomed Res. Int.*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/548254>

Buturi, C. V., Mauro, R. P., Fogliano, V., Leonardi, C., & Giuffrida, F. (2023). Iron and zinc biofortification and bioaccessibility in carrot ‘Dordogne’: Comparison between foliar applications of chelate and sulphate forms. *Sci Hortic.*, 312, 111851. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2023.111851>

Buturi, C. V., Mauro, R. P., Fogliano, V., Leonardi, C., & Giuffrida, F. (2021). Mineral biofortification of vegetables as a tool to improve human diet. *Foods*, 10(2), 223. <https://doi.org/10.3390/FOODS10020223>

Cakmak, I., & Kutman, U. B. (2018). Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. *Eur. J. Soil Sci.*, 69(1), 172–180. <https://doi.org/10.1111/ejss.12437>

Cantarella, H. ; Quaggio, J.A. ; Mattos J. R., D. ; Boaretto, R. M. ; Raij, B. Van .(2022). Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 1. ed.Campinas: Instituto Agrônômico, 1, 489p.

Cardoso, A. A. de S., Gomes, F. T. de L., Antonio, J. R. R., Guilherme, L. R. G., Liu, J., Li, L., & Silva, M. L. de S. (2022). Sulfate availability and soil selenate adsorption alleviate selenium toxicity in rice plants. *Environ. Exp. Bot.*, 201, 104971. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2022.104971>

Chasapis, C. T., Ntoupa, P. S. A., Spiliopoulou, C. A., & Stefanidou, M. E. (2020). Recent aspects of the effects of zinc on human health. *Arch. Toxicol.*, 94(5), 1443–1460. <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02702-9>

Chattha, M. U., Hassan, M. U., Khan, I., Chattha, M. B., Mahmood, A., Nawaz, M., Subhani, M. N., Kharal, M., & Khan, S. (2017). Biofortification of wheat cultivars to combat zinc deficiency. *Front. Plant Sci.*, 8, 225926. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2017.00281/BIBTEX>

Cipriano, P. E., Siueia Júnior, M., de Souza, R. R., da Silva, D. F., da Silva, R. F., Faquin, V., de Souza Silva, M. L., & Guilherme, L. R. G. (2022). Macronutrients content of radishes and the influence of biofortification with selenium. *Sci Hortic.*, 296, 110908. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2022.110908>

da Silva, D. F., Cipriano, P. E., de Souza, R. R., Siueia, M., Faquin, V., de Souza Silva, M. L., & Guilherme, L. R. G. (2020). Biofortification with selenium and implications in the absorption of macronutrients in *Raphanus sativus* L. *J Food Compos Anal.* 86, 103382. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2019.103382>

- de Almeida, H., Carmona, V. M. V., Inocência, M. F., Furtini Neto, A. E., Cecílio Filho, A. B., & Mauad, M. (2020). Soil Type and Zinc doses in agronomic biofortification of Lettuce Genotypes. *Agronomy*, 10(1), 124. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10010124>
- de Groote, H., Tessema, M., Gameda, S., & Gunaratna, N. S. (2021). Soil zinc, serum zinc, and the potential for agronomic biofortification to reduce human zinc deficiency in Ethiopia. *Sci. Rep.*, 11(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88304-6>
- de Lima, B. M., Noboa, C. S., de Lima, F. M., da Costa Mello, S., Purquerio, L. F. V., & Sala, F. C. (2023). Agronomic biofortification with zinc in hydroponically cultivated lettuce. *Aust. J. Crop Sci.* 17(2), 198–205. <https://doi.org/10.21475/AJCS.23.17.02.P3786>
- de Oliveira, V. C., Faquin, V., Andrade, F. R., Carneiro, J. P., da Silva Júnior, E. C., de Souza, K. R. D., Pereira, J., & Guilherme, L. R. G. (2019). Physiological and physicochemical responses of potato to selenium biofortification in tropical soil. *Potato Res.*, 62(3), 315–331. <https://doi.org/10.1007/S11540-019-9413-8/FIGURES/7>
- Dhillon, K. S., Dhillon, S. K., & Bijay-Singh. (2019). Genesis of seleniferous soils and associated animal and human health problems. *Adv. Agron.*, 154, 1–80. <https://doi.org/10.1016/BS.AGRON.2018.11.001>
- Ding, J., Liu, L., Wang, C., Shi, L., Xu, F., & Cai, H. (2021). High level of zinc triggers phosphorus starvation by inhibiting root-to-shoot translocation and preferential distribution of phosphorus in rice plants. *Environ Pollut.*, 277, 116778. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.116778>
- Dinh, Q. T., Cui, Z., Huang, J., Tran, T. A. T., Wang, D., Yang, W., Zhou, F., Wang, M., Yu, D., & Liang, D. (2018). Selenium distribution in the Chinese environment and its relationship with human health: A review. *Environ. Int.*, 112, 294–309. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.12.035>
- Drahoňovský, J., Száková, J., Mestek, O., Tremlová, J., Kaňa, A., Najmanová, J., & Tlustoš, P. (2016). Selenium uptake, transformation and inter-element interactions by selected wildlife plant species after foliar selenate application. *Environ. Exp. Bot.*, 125, 12–19. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2016.01.006>
- Fan, X., Zhou, X., Chen, H., Tang, M., & Xie, X. (2021). Cross-Talks Between Macro- and Micronutrient Uptake and Signaling in Plants. *Front. Plant Sci.*, 12, 663477. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2021.663477/BIBTEX>
- Fariduddin, Q., Saleem, M., Khan, T. A., & Hayat, S. (2022). Zinc as a Versatile Element in Plants: An Overview on Its Uptake, Translocation, Assimilatory Roles, Deficiency and Toxicity Symptoms. *Microbial Biofertilizers and Micronutrient Availability: The Role of Zinc in Agriculture and Human Health*, 137–158. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76609-2_7
- Ferro, C., Florindo, H. F., & Santos, H. A. (2021). Selenium Nanoparticles for Biomedical Applications: From Development and Characterization to Therapeutics. *Adv. Healthc. Mater.*, 10(16). <https://doi.org/10.1002/adhm.202100598>

Frossard, E., Bucher, M., Mächler, F., Mozafar, A., & Hurrell, R. (2000). Potential for increasing the content and bioavailability of Fe, Zn and Ca in plants for human nutrition. *J Sci Food Agric.*, 80(7), 861-879. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(20000515\)80:7%3C861::AID-JSFA601%3E3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(20000515)80:7%3C861::AID-JSFA601%3E3.0.CO;2-P)

Gaucin-Delgado, J. M., Hernándezmontiel, L. G., Sánchez-Chavez, E., Ortegaortiz, H., Fortis-Hernández, M., Reyes-Pérez, J. J., & Preciado-Rangel, P. (2020). Agronomic biofortification with selenium improves the yield and nutraceutical quality in tomato under soilless conditions. *Not Bot Horti Agrobot Cluj Napoca*, 48(3), 1221–1232. <https://doi.org/10.15835/NBHA48312000>

Georgiadou, E. C., Kowalska, E., Patla, K., Kulbat, K., Smolińska, B., Leszczyńska, J., & Fotopoulos, V. (2018). Influence of heavy metals (Ni, Cu, and Zn) on nitro-oxidative stress responses, proteome regulation and allergen production in basil (*Ocimum basilicum* L.) plants. *Front. Plant. Sci.*, 9, 374129. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2018.00862/BIBTEX>

Gondal, A. H. (2021). A Detailed Review Study of Zinc Involvement in Animal, Plant and Human Nutrition. *Indian J. Pure Appl. Biosci.*, 9(2), 262–271. <https://doi.org/10.18782/2582-2845.8652>

Gouveia, G. C. C., Galindo, F. S., Dantas Bereta Lanza, M. G., Caroline da Rocha Silva, A., Pereira de Brito Mateus, M., Souza da Silva, M., Rimoldi Tavanti, R. F., Tavanti, T. R., Lavres, J., & Reis, A. R. dos. (2020). Selenium toxicity stress-induced phenotypical, biochemical and physiological responses in rice plants: Characterization of symptoms and plant metabolic adjustment. *Ecotoxicol Environ Saf*, 202, 110916. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2020.110916>

Gui, J. Y., Rao, S., Huang, X., Liu, X., Cheng, S., & Xu, F. (2022). Interaction between selenium and essential micronutrient elements in plants: A systematic review. *Sci. Total Environ.*, 853, 158673. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158673>

Gupta, N., Ram, H., & Kumar, B. (2016). Mechanism of Zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, 15(1), 89–109. <https://doi.org/10.1007/S11157-016-9390-1>

Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I. S., & White, P. (2012). Functions of Macronutrients. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition*, 135–189. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>

Hsu, F. C., Wirtz, M., Heppel, S. C., Bogs, J., Krämer, U., Khan, M. S., Bub, A., Hell, R., & Rausch, T. (2011). Generation of Se-fortified broccoli as functional food: impact of Se fertilization on S metabolism. *Plant Cell Environ*, 34(2), 192–207. <https://doi.org/10.1111/J.1365-3040.2010.02235.X>

Huang, S., Gao, L., Fu, G., Du, S., Wang, Q., Li, H., & Wan, Y. (2023). Interactive effects between zinc and selenium on mineral element accumulation and fruit quality of strawberry. *Agronomy*, 13(10), 2453. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13102453>

- Huang, S., Wang, P., Yamaji, N., & Ma, J. F. (2020). Plant nutrition for human nutrition: hints from rice research and future perspectives. *Mol Plant*, 13(6), 825–835. <https://doi.org/10.1016/J.MOLP.2020.05.007>
- Hussain, A., Jiang, W., Wang, X., Shahid, S., Saba, N., Ahmad, M., Dar, A., Masood, S. U., Imran, M., & Mustafa, A. (2022). Mechanistic impact of zinc deficiency in human development. *Front. nutr.*, 9, 717064. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2022.717064/BIBTEX>
- Ikram, S., Li, Y., Lin, C., Yi, D., Heng, W., Li, Q., Tao, L., Hongjun, Y., & Weijie, J. (2024). Selenium in plants: A nexus of growth, antioxidants, and phytohormones. *J. Plant Physiol.* 296, 154237. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2024.154237>
- Khan, G. A., Bouraine, S., Wege, S., Li, Y., Carbonnel, M. de, Berthomieu, P., Poirier, Y., & Rouached, H. (2014). Coordination between zinc and phosphate homeostasis involves the transcription factor PHR1, the phosphate exporter PHO1, and its homologue PHO1;H3 in *Arabidopsis*. *J. Exp. Bot.*, 65(3), 871–884. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERT444>
- Khan, M. I. R., Nazir, F., Maheshwari, C., Chopra, P., Chhillar, H., & Sreenivasulu, N. (2023). Mineral nutrients in plants under changing environments: A road to future food and nutrition security. *Plant Genome*, 16(4), e20362. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20362>
- Khan, S. T., Malik, A., Alwarthan, A., & Shaik, M. R. (2022). The enormity of the zinc deficiency problem and available solutions; an overview. *Arab. J. Chem.*, 15(3), 103668. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2021.103668>
- Kieliszek, M., Bano, I., & Zare, H. (2022). A comprehensive review on selenium and its effects on human health and distribution in middle eastern countries. *Biol. Trace Elem. Res.*, 200, 971–987. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-02716-z/Published>
- Kopsell, D. A., & Randle, W. M. (1999). Selenium affects the S-alk(en)yl cysteine sulfoxides among short-day onion cultivars. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 124(3), 307–311. <https://doi.org/10.21273/JASHS.124.3.307>
- Krishna, T. P. A., Maharajan, T., & Ceasar, S. A. (2022). The role of membrane transporters in the biofortification of zinc and iron in plants. *Biol. Trace Elem. Res.* 201(1), 464–478. <https://doi.org/10.1007/S12011-022-03159-W>
- Kumar, S., Kumar, S., & Mohapatra, T. (2021). Interaction Between Macro- and Micro-Nutrients in Plants. *Front. Plant Sci.*, 12.665583. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.665583>
- Lambers, H. (2022). Phosphorus Acquisition and Utilization in Plants. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 73, 17–42. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ARPLANT-102720-125738/CITE/REFWORKS>
- Lei, Z., Li, Q., Tang, Y., Zhang, H., Han, C., Wang, X., Zhao, X., & Shi, G. (2022). Selenium enhanced nitrogen accumulation in legumes in soil with rhizobia bacteria. *Clean. Prod.*, 380, 134960. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.134960>
- Li, S., Zhou, X., Huang, Y., Zhu, L., Zhang, S., Zhao, Y., Guo, J., Chen, J., & Chen, R. (2013). Identification and characterization of the zinc-regulated transporters, iron-regulated

transporter-like protein (ZIP) gene family in maize. *BMC Plant Biol.*, 13(1), 1–14.
<https://doi.org/10.1186/1471-2229-13-114/FIGURES/6>

Lima, G. P. P., Gómez, H. A. G., Seabra Junior, S., Maraschin, M., Tecchio, M. A., & Borges, C. V. (2022). Functional and nutraceutical compounds of tomatoes as affected by agronomic practices, postharvest management, and processing methods: A mini review. *Front. nutr.*, 9, 868492. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2022.868492/BIBTEX>

López-Morales, D., de la Cruz-Lázaro, E., Sánchez-Chávez, E., Preciado-Rangel, P., Márquez-Quiroz, C., & Osorio-Osorio, R. (2020). Impact of agronomic biofortification with zinc on the nutrient content, bioactive compounds, and antioxidant capacity of cowpea bean (*Vigna unguiculata* L. Walpers). *Agronomy*, 10(10), 1460.
<https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10101460>

Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. (1997). *Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações*. 2th ed. Piracicaba, Potafos, 319 p.

Moulick, D., Mukherjee, A., Das, A., Roy, A., Majumdar, A., Dhar, A., Pattanaik, B. K., Chowardhara, B., Ghosh, D., Upadhyay, M. K., Yadav, P., Hazra, S., Sarkar, S., Mahanta, S., Santra, S. C., Choudhury, S., Maitra, S., Mishra, U. N., Bhutia, K. L., ... Hossain, A. (2024). Selenium – An environmentally friendly micronutrient in agroecosystem in the modern era: An overview of 50-year findings. *Ecotoxicol Environ Saf*, 270, 115832.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115832>

Naeem, A., Aslam, M., & Lodhi, A. (2018). Improved potassium nutrition retrieves phosphorus-induced decrease in zinc uptake and grain zinc concentration of wheat. *J. Sci. Food Agric.*, 98(11), 4351–4356. <https://doi.org/10.1002/JSFA.8961>

Nagar, B. L., Singh, J., Yadav, D. L., Verma, H. P., & Meena, R. R. (2024). Agronomic zinc biofortification of potato (*Solanum tuberosum*) through soil and foliar zinc sulphate application in Rajasthan. *Indian J. Agric. Sci.* 94(1), 016–020.
<https://doi.org/10.56093/IJAS.V94I1.141924>

Natasha, N., Shahid, M., Bibi, I., Iqbal, J., Khalid, S., Murtaza, B., Bakhat, H. F., Farooq, A. B. U., Amjad, M., Hammad, H. M., Niazi, N. K., & Arshad, M. (2022). Zinc in soil-plant-human system: A data-analysis review. *Sci. Total Environ.*, 808, 152024.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.152024>

Ning, X., Lin, M., Huang, G., Mao, J., Gao, Z., & Wang, X. (2023). Research progress on iron absorption, transport, and molecular regulation strategy in plants. *Front. Plant Sci.* 14, 1190768. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1190768/BIBTEX>

Ova, E. A., Kutman, U. B., Ozturk, L., & Cakmak, I. (2015). High phosphorus supply reduced zinc concentration of wheat in native soil but not in autoclaved soil or nutrient solution. *Plant and Soil*, 393(1–2), 147–162. <https://doi.org/10.1007/S11104-015-2483-8/FIGURES/5>

Phattarakul, N., Rerkasem, B., Li, L. J., Wu, L. H., Zou, C. Q., Ram, H., Sohu, V. S., Kang, B. S., Surek, H., Kalayci, M., Yazici, A., Zhang, F. S., & Cakmak, I. (2012). Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries. *Plant and Soil*, 361(1–2), 131–141. <https://doi.org/10.1007/S11104-012-1211-X/FIGURES/4>

- Preciado-Rangel, P., Hernández-Montiel, L. G., Valdez-Cepeda, R. D., de la Cruz-Lázaro, E., Lara-Capistrán, L., Morales-Morales, B., & Gaucin-Delgado, J. M. (2021). Biofortification with selenium increases bioactive compounds and antioxidant capacity in tomato fruits. *Terra Latinoam*, 39. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V39I0.979>
- Rabbi, R. H. Md., Chowdhury, Md. A. H., & Saha, B. K. (2023). Agronomic Biofortification of Zinc in Tomato. *J. Plant Nutr.* 1-15. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4316458>
- Rahim, F. P., Rocio, C. G., Adalberto, B. M., Rosaura, S. C. L., Maginot, N. H., Villa, F., Ex-Hacienda, C., Canad , E., & León, N. (2020). Agronomic Biofortification with Selenium in Tomato Crops (*Solanum lycopersicon* L. Mill). *Agriculture*, 10(10), 486. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE10100486>
- Ramzan, Y., Hafeez, M. B., Khan, S., Nadeem, M., Saleem-ur-Rahman, Batool, S., & Ahmad, J. (2020). Biofortification with zinc and iron improves the grain quality and yield of wheat crop. *Int. J. Plant Prod.*, 14(3), 501–510. <https://doi.org/10.1007/S42106-020-00100-W/FIGURES/3>
- Rayman, M. P. (2020). Selenium intake, status, and health: a complex relationship. *Hormones*, 19(1), 9–14. <https://doi.org/10.1007/s42000-019-00125-5>
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. 2020.
- Raza, H. M. A., Bashir, M. A., Rehim, A., Jan, M., Raza, Q. U. A., & Berlyn, G. P. (2021). Potassium and zinc co-fertilization provides new insights to improve maize (*Zea mays* L.) physiology and productivity. *Pak. J. Bot.*, 53(6), 2059–2065. [https://doi.org/10.30848/PJB2021-6\(28\)](https://doi.org/10.30848/PJB2021-6(28))
- Reis, H. P. G., de Queiroz Barcelos, J. P., Silva, V. M., Santos, E. F., Tavanti, R. F. R., Putti, F. F., ... & Dos Reis, A. R. (2020). Agronomic biofortification with selenium impacts storage proteins in grains of upland rice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(5), 1990-1997. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10212>
- Ribeiro, D. M., Silva Júnior, D. D., Cardoso, F. B., Martins, A. O., Silva, W. A., Nascimento, V. L., & Araújo, W. L. (2016). Growth inhibition by selenium is associated with changes in primary metabolism and nutrient levels in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Environ.*, 39(10), 2235–2246. <https://doi.org/10.1111/PCE.12783>
- Sabatino, L., la Bella, S., Ntatsi, G., Iapichino, G., D’Anna, F., de Pasquale, C., Consentino, B. B., & Roupheal, Y. (2021). Selenium biofortification and grafting modulate plant performance and functional features of cherry tomato grown in a soilless system. *Sci. Hortic.*, 285, 110095. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2021.110095>
- Saeed, K., Nisa, F. K., Abdalla, M. A., & Mühling, K. H. (2023). The interplay of sulfur and selenium enabling variations in micronutrient accumulation in red spinach. *Int. J. Mol. Sci.*, 24(16), 12766. <https://doi.org/10.3390/IJMS241612766>

Santiago, F. E. M., Silva, M. L. de S., Ribeiro, F. de O., Cipriano, P. E., & Guilherme, L. R. G. (2018). Influence of sulfur on selenium absorption in strawberry. *Acta Sci. Agron.*, 40(1), e35780. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v40i1.35780>

Santos, H. G. Dos; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C. dos; Oliveira, V. A. de; Lumbreras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A. de; Araújo Filho, J. C. de; Oliveira, J. B. de; Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos* (Embrapa). 5th ed. Brasília, DF: Embrapa. ISBN 978-85-7035-817-2.

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199517/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>

Schiavon, M., Berto, C., Malagoli, M., Trentin, A., Sambo, P., Dall'Acqua, S., & Pilon-Smits, E. A. H. (2016). Selenium biofortification in radish enhances nutritional quality via accumulation of methyl-selenocysteine and promotion of transcripts and metabolites related to glucosinolates, phenolics amino acids. *Front. Plant Sci.*, 7, 209375. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2016.01371/BIBTEX>

Schiavon, M., Lima, L. W., Jiang, Y., & Hawkesford, M. J. (2017). Effects of Selenium on Plant Metabolism and Implications for Crops and Consumers. 257–275. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56249-0_15

Schiavon, M., Nardi, S., Dalla Vecchia, F., & Ertani, A. (2020). Selenium biofortification in the 21st century: status and challenges for healthy human nutrition. *Plant and Soil*, 453(1–2), 245–270. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04635-9>

Sheoran, S., Kumar, S., Ramtekey, V., Kar, P., Meena, R. S., & Jangir, C. K. (2022). Current Status and Potential of Biofortification to Enhance Crop Nutritional Quality: An Overview. *Sustainability*, 14(6), 3301. <https://doi.org/10.3390/SU14063301>

Silva, F. C. da. (2009). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. 2th ed. Embrapa informações tecnológicas. Brasília. 627 p. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330496>

Silva, V. M., Wilson, L., Young, S. D., Broadley, M. R., White, P. J., & Reis, A. R. dos. (2023). Interaction between sulfur and selenium in agronomic biofortification of cowpea plants under field conditions. *Plant and Soil*, 486(1–2), 69–85. <https://doi.org/10.1007/S11104-022-05480-8/FIGURES/6>

Silva, V. M., Tavanti, R. F. R., Gratão, P. L., Alcock, T. D., & Dos Reis, A. R. (2020). Selenate and selenite affect photosynthetic pigments and ROS scavenging through distinct mechanisms in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) walp) plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 201, 110777. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110777>

Stiles, L. I., Ferrao, K., & Mehta, K. J. (2024). Role of zinc in health and disease. *Clin. Exp. Med.*, 24(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/S10238-024-01302-6>

Su, D., Xue, S., Tie, M., Sun, J., & He, Z. (2024). Exogenous selenium foliar application on nutrition, grain yield and quality of rice (*Oryza sativa* L.). *J. Food Compost. Anal.* 130, 106145. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2024.106145>

Szerement, J., Szatanik-Kloc, A., Mokrzycki, J., & Mierzwa-Hersztek, M. (2022). Agronomic Biofortification with Se, Zn, and Fe: An Effective Strategy to Enhance Crop Nutritional Quality and Stress Defense—A Review. *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 22(1), 1129–1159. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00719-2>

Tavanti, T. R., Melo, A. A. R. de, Moreira, L. D. K., Sanchez, D. E. J., Silva, R. dos S., Silva, R. M. da, & Reis, A. R. dos. (2021). Micronutrient fertilization enhances ROS scavenging system for alleviation of abiotic stresses in plants. *J. Plant Physiol. Biochem.*, 160, 386–396. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2021.01.040>

Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (2017). Manual de métodos de análise de solo. 3th ed. Embrapa. 514 p. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>

Ulhassan, Z., Huang, Q., Gill, R. A., Ali, S., Mwamba, T. M., Ali, B., Hina, F., & Zhou, W. (2019). Protective mechanisms of melatonin against selenium toxicity in *Brassica napus*: Insights into physiological traits, thiol biosynthesis and antioxidant machinery. *BMC Plant Biol.*, 19(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/S12870-019-2110-6/FIGURES/6>

U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency) (2007) Method 3051A (SW-846): Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges and oils. In: Environmental Sampling and Analytical Methods (ESAM) Program, Washington, DC

Verma, T. S., & Minhas, R. S. (1987). Zinc and phosphorus interaction in a wheat-maize cropping system. *Fertilizer Research*, 13(1), 77–86. <https://doi.org/10.1007/BF01049804/METRICS>

Vert, G., Grotz, N., Dédaldéchamp, F., Gaymard, F., Guerinot, M. lou, Briat, J. F., & Curie, C. (2002). IRT1, an Arabidopsis transporter essential for iron uptake from the soil and for plant growth. *The Plant Cell*, 14(6), 1223–1233. <https://doi.org/10.1105/TPC.001388>

Wang, C., Li, M., Duan, X., Abu-Izneid, T., Rauf, A., Khan, Z., Mitra, S., Emran, T. bin, Aljohani, A. S. M., Alhumaydhi, F. A., Thiruvengadam, M., & Suleria, H. A. R. (2023). Phytochemical and nutritional profiling of tomatoes; impact of processing on bioavailability - a comprehensive review. *Food Rev. Int.* 39(8), 5986–6010. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2097692>

Wang, J., Mao, S., Xu, H., Wu, Q., Liang, M., Yuan, Y., Liu, M., Huang, K., & Wu, Q. (2020). Effects of sulfur and selenium on glucosinolate biosynthesis in cabbage. *Plant Mol. Biol. Rep.*, 38(1), 62–74. <https://doi.org/10.1007/S11105-019-01178-X/FIGURES/8>

White, P. J. (2018). Selenium metabolism in plants. *Biochim. Biophys. Acta - General Subjects*, 1862(11), 2333–2342. <https://doi.org/10.1016/J.BBAGEN.2018.05.006>

White, P. J., & Broadley, M. R. (2011). Physiological limits to zinc biofortification of edible crops. *Front. Plant Sci.*, 2, 15683. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2011.00080/BIBTEX>

Xie, X., Hu, W., Fan, X., Chen, H., & Tang, M. (2019). Interactions between phosphorus, zinc, and iron homeostasis in nonmycorrhizal and mycorrhizal plants. *Front. Plant Sci.*, 10, 460637. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.01172/BIBTEX>

Yang, H., Yang, X., Ning, Z., Kwon, S. Y., Li, M. L., Tack, F. M. G., Kwon, E. E., Rinklebe, J., & Yin, R. (2022). The beneficial and hazardous effects of selenium on the health of the soil-plant-human system: An overview. *J. Hazard. Mater.*, 422. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126876>

Younas, N., Fatima, I., Ahmad, I. A., & Ayyaz, M. K. (2023). Alleviation of zinc deficiency in plants and humans through an effective technique; biofortification: A detailed review. *Acta Ecol. Sin.*, 43(3), 419–425. <https://doi.org/10.1016/J.CHNAES.2022.07.008>

Zhang, L., & Chu, C. (2022). Selenium uptake, transport, metabolism, reutilization, and biofortification in rice. *Rice*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s12284-022-00572-6>

Zhou, X., Yang, J., Kronzucker, H. J., & Shi, W. (2020). Selenium Biofortification and Interaction With Other Elements in Plants: A Review. *Front. Plant Sci.*, 11, 586421. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.586421/BIBTEX>

Zhu, Z., Zhang, Y., Liu, J., Chen, Y., & Zhang, X. (2018). Exploring the effects of selenium treatment on the nutritional quality of tomato fruit. *Food Chem.*, 252, 9-15. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.01.064>

ARTIGO 2 - EFEITOS DA APLICAÇÃO SIMULTÂNEA DE SELÊNIO E ZINCO NA QUALIDADE DO TOMATE

Fabício Teixeira de Lima Gomes^a, Estela Corrêa de Azevedo^b, Luíz Guilherme Malaquias da Silva^b, Edinei José Armani Borghi^a, Ane Caroline Melo Ferreira^a, Francis Eliakin Portillo Maganã^a, Eduardo Valério de Barros Vilas Boas^b, Maria Ligia de Souza Silva^{a*}

^aDepartamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras (ESAL-UFLA), 37200-900, Lavras, MG, Brazil.

^bDepartamento de Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Lavras (ESAL/UFLA), 37200-900, Lavras, MG, Brazil.

(Formatado de acordo com as normas NBR 6022 (ABNT 2018))

RESUMO

A deficiência de selênio (Se) e zinco (Zn) na população representa um sério desafio para a saúde global. Nesse sentido, a biofortificação agronômica vem sendo estudada como alternativa para aumentar o teor de nutrientes nos alimentos. Contudo, a aplicação simultânea de Se e Zn podem afetar o metabolismo das plantas, influenciando na produção e na qualidade dos produtos agrícolas. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da aplicação simultânea de Se e Zn sobre a produção e qualidade do tomate. O experimento foi conduzido em casa de vegetação em delineamento inteiramente casualizado. Os tratamentos consistiram na combinação de três doses de Se (0, 25 e 50 $\mu\text{g dm}^{-3}$), utilizando como fonte o selenato de sódio (Na_2SeO_4), e quatro doses de Zn (4, 8, 12 e 16 mg dm^{-3}), utilizando como fonte o cloreto de zinco (ZnCl_2). Também foi adicionado um controle, onde não houve a aplicação dos elementos. A unidade experimental foi composta por um vaso com 5 dm^3 de solo e uma planta de tomateiro (*Solanum lycopersicum* L. cv. Sweet Heaven). Os frutos foram caracterizados quanto ao número de frutos por planta, peso de fruto, produção, diâmetro, comprimento, parâmetros de cor e firmeza. Para avaliação da qualidade do tomate foram avaliados o pH, sólidos solúveis totais, acidez titulável, teores de licopeno, β -caroteno, vitamina C, fenólicos totais, flavonoides totais, antocianinas totais e composição mineral. O fornecimento de Se juntamente com 4 mg dm^{-3} de Zn aumentou a massa dos frutos, o que contribuiu para maior produtividade. O fornecimento de Se e Zn aumentou os teores de β -caroteno, vitamina C, flavonóides totais e antocianinas totais, em comparação ao controle. A adição de Se e Zn aumentou os teores dos elementos no fruto. Além disso, influenciaram positivamente nos teores de N e Cu. A biofortificação simultânea com Se e Zn mostra grande potencial para melhorar a qualidade do tomate. O fornecimento de Se é importante para enriquecer os frutos devido a baixa disponibilidade do elemento no solo, entretanto, a dose de Zn deve ser ajustada de acordo com a finalidade específica.

Palavras - chave: *Solanum lycopersicum* L; biofortificação agronômica; segurança alimentar; compostos bioativos; nutrição de plantas.

ABSTRACT

Selenium (Se) and zinc (Zn) deficiency in the population represents a serious challenge to global health. In this sense, agronomic biofortification has been studied as an alternative to increase the nutrient content in foods. However, the simultaneous application of Se and Zn can affect plant metabolism, influencing the production and quality of agricultural products. Thus, the objective of this study was to evaluate the effect of the simultaneous application of Se and Zn on tomato production and quality. The experiment was conducted in a greenhouse in a completely randomized design. The treatments consisted of a combination of three doses of Se (0, 25 and 50 $\mu\text{g dm}^{-3}$), using sodium selenate (Na_2SeO_4) as a source, and four doses of Zn (4, 8, 12 and 16 mg dm^{-3}), using zinc chloride (ZnCl_2) as a source. A control was also added, where the elements were not applied. The experimental unit consisted of a pot with 5 dm^3 of soil and a tomato plant (*Solanum lycopersicum* L. cv. Sweet Heaven). The fruits were characterized regarding the number of fruits per plant, fruit weight, production, diameter, length, color and firmness parameters. To assess tomato quality, pH, total soluble solids, titratable acidity, lycopene, β -carotene, vitamin C, total phenolics, total flavonoids, total anthocyanins and mineral composition were evaluated. The supply of Se together with 4 mg dm^{-3} of Zn increased fruit mass, which contributed to greater yield. The supply of Se and Zn increased the levels of β -carotene, vitamin C, total flavonoids and total anthocyanins, compared to the control. The addition of Se and Zn increased the element contents in the fruit. Furthermore, they positively influenced the N and Cu contents. Simultaneous biofortification with Se and Zn shows great potential to improve tomato quality. The supply of Se is important to enrich the fruits due to the low availability of the element in the soil, however, the dose of Zn must be adjusted according to the specific purpose.

Keywords: *Solanum lycopersicum* L.; agronomic biofortification; food security; bioactive compounds; plant nutrition.

1 INTRODUÇÃO

A deficiência de zinco (Zn) e selênio (Se) representa um sério desafio para a saúde global, afetando mais de um terço da população mundial, especialmente nos países em desenvolvimento (Cakmak *et al.*, 2020). Essas deficiências são comumente denominadas "fome oculta" e constituem uma forma significativa de desnutrição humana (Harding *et al.*, 2018). Para superar esse problema, o segundo objetivo de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas busca erradicar a fome extrema e a desnutrição, ao mesmo tempo que promove a segurança alimentar por meio de práticas agrícolas mais sustentáveis (Gil *et al.*, 2019; ONU, 2024). Nesse sentido, a biofortificação de alimentos básicos com nutrientes surge como uma estratégia eficaz e sustentável para combater a desnutrição (Zou *et al.*, 2019; Prom-U-Thai *et al.*, 2020; Duborská *et al.*, 2022).

Em humanos e animais, o Zn é essencial para atividades catalíticas de várias enzimas, desempenhando papel crucial na cicatrização de feridas, síntese de DNA, síntese de proteínas, função imunológica e divisão celular (Chasapis *et al.*, 2020; Younas *et al.*, 2023). O Se, por sua vez, como constituinte das selenoproteínas, participa de diversos processos biológicos, como defesa antioxidante, produção de hormônios tireoidianos e respostas imunológicas (Danso *et al.*, 2023; Genchi *et al.*, 2023). Assim, esses elementos devem estar presentes de forma equilibrada na dieta para o adequado funcionamento do organismo humano (Praharaj *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2022a). A ingestão recomendada de Zn é de 11 mg dia⁻¹ para homens e 8 mg dia⁻¹ para mulheres (Chasapis *et al.*, 2020), enquanto a dose dietética de Se é de 55 µg dia⁻¹ para humanos adultos (Wesselink *et al.*, 2019).

As plantas desempenham um papel indispensável na bioacumulação de Zn e Se nas cadeias alimentares, e a absorção desses elementos pelas plantas depende em grande parte da biodisponibilidade no solo (Natasha *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2022b). Nas plantas, o Zn é essencial para uma série de reações metabólicas, bioquímicas e fisiológicas importantes (Kaur; Garg, 2021). Por outro lado, embora não seja um elemento essencial, o Se quando em baixas concentrações é considerado um elemento benéfico para o crescimento vegetal (Xu *et al.*, 2021). Dessa forma, o fornecimento desses elementos às plantas pode contribuir para aumentar a produtividade das culturas, bem como a qualidade nutricional dos alimentos.

A biofortificação simultânea com Se e Zn já foi relatada em diversas culturas, mas com resultados divergentes. Efeitos positivos foram observados em brotos de pak choi (Xue *et al.*, 2020), soja (Dai *et al.*, 2020), ervilhas (Poblaciones; Rengel, 2017) e trigo (Germ *et al.*, 2013).

Por outro lado, um antagonismo foi relatado em arroz (Mangueze *et al.*, 2018), enquanto nenhuma interação foi encontrada em trigo (Mao *et al.*, 2014). Nota-se que as interações entre Se e Zn dependem da cultura, formas de aplicação, fontes e doses dos elementos. Portanto, uma melhor compreensão dos padrões de absorção e acumulação de Zn e Se em culturas amplamente consumidas pela população é crucial para o enriquecimento dos alimentos quando se aplicam minerais em conjunto.

O tomate (*Solanum lycopersicum* L.) destaca-se como uma das hortaliças mais produzidas e consumidas no mundo. O fruto apresenta altas concentrações de compostos antioxidantes naturais, como carotenóides (β -caroteno e licopeno), ácido ascórbico (vitamina C), tocoferol (vitamina E) e compostos fenólicos bioativos (Chaudhary *et al.*, 2018, Ali *et al.*, 2020). Portanto, o consumo regular de tomate pode prevenir e/ou atuar sobre algumas doenças humanas (Fraser *et al.*, 2020; Ali *et al.*, 2020). Assim, devido ao amplo consumo e os diversos benefícios para a saúde humana, o tomate torna-se uma cultura estratégica em estudo de biofortificação.

No presente estudo investigamos o efeito da aplicação simultânea de Se e Zn sobre a produção e qualidade do tomate, avaliando os parâmetros físicos, bioquímicos e composição de nutrientes a fim de identificar as melhores doses dos elementos para biofortificar os frutos sem afetar a sua produtividade. Nossa hipótese inicial foi que a aplicação simultânea de Se e Zn em tomateiro melhora a qualidade do tomate sem comprometer a sua produtividade.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com 13 tratamentos e três repetições, totalizando 39 parcelas experimentais. A unidade experimental foi composta por um vaso com capacidade de 5 dm³ de solo e uma planta de tomateiro tipo grape (*Solanum lycopersicum* L. cv. Sweet Heaven). Os tratamentos consistiram na combinação de três doses de Se (0, 25 e 50 $\mu\text{g dm}^{-3}$), utilizando como fonte o selenato de sódio (Na₂SeO₄), e quatro doses de Zn (4, 8, 12 e 16 mg dm⁻³), utilizando como fonte o cloreto de zinco (ZnCl₂). Também foi adicionado um controle, onde não houve a aplicação dos elementos. Todos os tratamentos foram aplicados via solo, na forma de solução nutritiva, aos dez dias após o transplântio (DAT) das mudas. As doses de Se foram baseadas em trabalhos realizados por Silva *et al.* (2020) e Reis *et al.* (2019) em solos tropicais. As doses de Zn foram definidas com

base na recomendação para o cultivo de tomateiro em solo com baixo teor natural do elemento (Cantarella *et al.*, 2022).

2.2 Condições de cultivo

O experimento foi conduzido em condições de casa de vegetação no Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil. A umidade relativa e a temperatura média do ar registradas no interior da casa de vegetação durante a condução do experimento foram $61,3 \pm 22,1\%$ e $27,9 \pm 6,9^\circ\text{C}$, respectivamente (HOBO UX100-003 Temp/RH). O solo utilizado foi coletado na camada de 0 - 0,20 m de profundidade, em área de vegetação nativa, sendo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média (Santos *et al.*, 2018). Uma amostra foi coletada e utilizada para as análises físicas e químicas (Teixeira *et al.*, 2017). O teor de Se foi determinado conforme USEPA (2007). Todos os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Análises químicas e físicas do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico coletado em área de vegetação nativa.

Propriedade	Unidade	Quantidade	Método/Extrator
pH	-	4,60	Água (1:25)
Al	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	0,20	KCl (1 mol L ⁻¹)
H + Al	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	2,50	SMP
M.O	g kg^{-1}	11,70	$\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (4 N) + H_2SO_4 (10 N)
K	mg dm^{-3}	24,82	Mehlich ⁻¹
P	mg dm^{-3}	0,98	Mehlich ⁻¹
Ca	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	0,69	KCl (1 mol L ⁻¹)
Mg	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	0,00	KCl (1 mol L ⁻¹)
S	mg dm^{-3}	2,10	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ + CH_3COOH
B	mg dm^{-3}	0,08	Água quente
Cu	mg dm^{-3}	0,46	Mehlich ⁻¹
Fe	mg dm^{-3}	74,0	Mehlich ⁻¹
Mn	mg dm^{-3}	4,90	Mehlich ⁻¹
Zn	mg dm^{-3}	0,60	Mehlich ⁻¹
Se	mg dm^{-3}	< LOD*	USEPA 3051A
Argila	g kg^{-1}	170	Hidrômetro
Silte	g kg^{-1}	60	Hidrômetro
Areia	g kg^{-1}	770	Hidrômetro

*Abaixo do limite de detecção (0,081 mg dm^{-3}).

Com base nas análises químicas do solo, foi realizada a correção do solo para elevar a saturação por bases para 80%, aplicando 0,690 g dm^{-3} de carbonato de cálcio (CaCO_3 , p.a) e 0,230 g dm^{-3} de carbonato de magnésio (MgCO_3 , p.a). Após a aplicação dos produtos, o solo

foi homogeneizado e incubado por 15 dias, com umidade próxima a 60% do volume total de poros (VTP). Após esse período, foi realizada a adubação básica com a aplicação de 30 mg de N (nitrato de amônio - NH_4NO_3), 150 mg de P (superfosfato triplo - 46% P_2O_5 e 13% Ca), 90 mg de K (cloreto de potássio - KCl), 20 mg de S (sulfato de amônio - $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) por dm^3 de solo.

As plantas de tomateiro foram obtidas de viveiro comercial e transplantadas para os vasos 35 dias após a semeadura, quando apresentavam três folhas verdadeiras completamente expandidas. Dez dias após o transplantio, foram aplicados os tratamentos juntamente com 1,25 mg de B (ácido bórico - H_3BO_3) e 0,75 mg de Cu (sulfato de cobre - $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) por dm^3 de solo. Durante o cultivo, as plantas foram adubadas em cobertura com 300 mg dm^{-3} de N e 300 mg dm^{-3} de K, utilizando nitrato de amônio (NH_4NO_3) e nitrato de potássio (KNO_3), respectivamente, divididas em 6 aplicações (aos 10, 20, 30, 40, 50 e 60 DAT). O solo permaneceu com umidade próxima a 60% da capacidade de campo, adicionando-se o volume evapotranspirado com água destilada.

A colheita dos frutos iniciou-se aos 55 DAT, e ocorreu durante um período de 30 dias. Os tomates foram colhidos aleatoriamente no estágio de maturação comercial (coloração vermelha plena e uniforme), nos cachos do terço médio das plantas. Os frutos foram avaliados quanto aos parâmetros físicos e de produção, posteriormente, foram lavados em água corrente, solução de ácido clorídrico (0,3 %) e água destilada (Barreto *et al.*, 2021). Em seguida os frutos foram congelados em nitrogênio líquido (N_{liq}), e armazenados em freezer a -80°C até uso posterior.

2.3 Componentes de produção e caracterização física

Os componentes de produção avaliados foram o número de frutos por planta (FN), massa de fruto (FM, g fruto^{-1}) e peso total dos frutos, contabilizando a produtividade (g planta^{-1}). O comprimento (mm) e diâmetro (mm) dos frutos foram medidos utilizando um paquímetro digital (MTX-316119), com precisão de 0,02 mm. A cor foi medida utilizando um medidor de croma (Konica Minolta, Japan, modelo CR - 400). Foram determinados a luminosidade (L^*), cromaticidade (C^*) e ângulo Hue ($^\circ\text{h}$). A firmeza dos frutos foi avaliada por meio da resistência do mesocarpo à penetração, utilizando um penetrômetro digital (Instrutherm, modelo PTR - 300). O fruto foi perfurado na zona equatorial, após a remoção do exocarpo, com uma sonda cilíndrica de aço inoxidável de 6 mm de diâmetro, e o resultado expresso em Newton

(N). Todas as avaliações foram realizadas em dez frutos por repetição de cada tratamento (n=30).

2.4 Caracterização bioquímica

2.4.1 pH, sólidos solúveis e acidez titulável

Para preparo do extrato, 3g de polpa previamente triturada em N_{liq} foram transferidas para tubo tipo Falcon, homogeneizada com 30 mL de água destilada e o extrato filtrado em filtro de papel (C42). O pH foi determinado utilizando um pHmetro digital (Kasvi, K38-2014B) previamente calibrado por meio de soluções tampão (pH 4,0 e 7,0). Os sólidos solúveis totais (SS) foram determinados utilizando um refratômetro digital (Reichert Ar-200). Após a realização de cada análise à temperatura ambiente ($25 \pm 1^\circ\text{C}$), o prisma do refratômetro foi cuidadosamente limpo com água destilada, e os resultados expressos em porcentagem (%). A acidez titulável (TA) foi quantificada por titulação com hidróxido de sódio (0,01 N) e os resultados expressos como % de ácido cítrico. Todas as análises foram realizadas de acordo com a AOAC (2019). A relação entre SS e TA (SS/TA) também foi calculada.

2.4.2 Carotenóides

A extração e quantificação dos carotenóides (licopeno e β -caroteno) foram realizadas segundo o método validado por Nagata e Yamashita (1992), com algumas modificações. Resumidamente, 2g de polpa previamente triturada em N_{liq} foi transferida para um tubo tipo Falcon e homogeneizada com 10 mL de solução extratora acetona:hexano (4:6). Posteriormente foi sonicado em banho ultrassônico por 15 min e o extrato filtrado. A absorbância foi medida em espectrofotômetro (Bel photonics, 1105) a 663 nm (clorofila a), 645 nm (clorofila b), 505 nm (licopeno) e 453 nm (β -caroteno). Os teores de licopeno e β -caroteno foram calculados usando as seguintes equações:

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

$$\beta\text{-caroteno (mg/100 mL)} = [(0,216 * A_{663}) - (1,22 * A_{645}) - (0,304 * A_{505}) + (0,452 * A_{453})]$$

Os resultados foram transformados para serem expressos em mg por 100 g de massa fresca ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ MF}$).

2.4.3 Quantificação da vitamina C

A vitamina C foi quantificada de acordo com o método proposto por Strohecker, Zaragoza e Henning (1967). A absorbância foi medida a 520 nm em um leitor de microplaca de 96 poços (Biochrom EZ Read 2000). O teor de vitamina C foi expresso em mg de ácido ascórbico por 100 g de massa fresca ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ MF}$).

2.4.4 Conteúdo de fenólicos totais, flavonóides totais e antocianinas totais

Os compostos fenólicos totais (TPC) e os flavonoides totais (TFC) foram extraídos de acordo com metodologia descrita por Zhita *et al.* 2022. O teor de fenólicos totais (TPC) foi quantificado espectrofotometricamente, em um leitor de microplaca de 96 poços (Biochrom EZ Read 2000), utilizando o reagente Folin-Ciocalteau (Zitha et al. 2022). O resultado foi expresso em mg de equivalentes de ácido gálico por 100 g de massa fresca ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ MF}$).

O teor de flavonóides totais (TFC) foi determinado através do ensaio colorimétrico com cloreto de alumínio (Tohidi *et al.*, 2017), com algumas modificações. Resumidamente, 125 μL de extrato foi adicionado em um tubo de ensaio (10 mL) juntamente com 75 μL de nitrito de sódio (5%). Após 6 minutos de reação em repouso no escuro, foi adicionado 150 μL de cloreto de alumínio (10%), e a mistura permaneceu em repouso durante 5 minutos. Em seguida, foram adicionados simultaneamente 750 μL de hidróxido de sódio (1M) e 1400 μL de água destilada. Após homogeneização em vortex (Kasvi, K45-2810) e incubação por 15 min, a absorbância foi medida a 415 nm em um leitor de microplaca de 96 poços (Biochrom EZ Read 2000). Os resultados foram expressos em mg de equivalentes de quercetina por 100 g de massa fresca ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ MF}$).

A análise do teor de antocianinas totais (TAC) foi realizada pelo método do pH diferencial proposto por Giusti e Wrolstad (2001). A absorbância foi medida a 520 nm e 700 nm, em um leitor de microplaca de 96 poços (Biochrom EZ Read 2000). O teor de antocianina total foi expresso em mg de cianidina-3-glucosídeo presentes em 100 g de massa fresca ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ MF}$).

2.5 Análise da composição mineral

Para determinação do teor de nutrientes e Se, aproximadamente 100g de frutos foram colocados em bandeijas de alumínio, secos em estufa com circulação de ar forçada (45°C), até atingirem peso constante. Posteriormente foram pesados para determinação da umidade (%),

moídos e submetidos às análises químicas. Os teores de Se e Zn, bem como os teores de macronutrientes (P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Cu, Fe e Mn) foram determinados conforme Malavolta *et al.*, (1997), adaptado por Silva Junior *et al.* (2017). Os teores foram determinados por espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). O teor de N e B foram determinados conforme Malavolta *et al.*, (1997). Os resultados foram expressos em mg por 100 g de massa fresca ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ MF}$) para macronutrientes e μg por 100 g de peso fresco ($\mu\text{g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ MF}$) para micronutrientes e Se. Com base nos teores de Zn e Se, foi calculada a relação entre estes elementos (Zn/Se).

2.7 Análise estatística

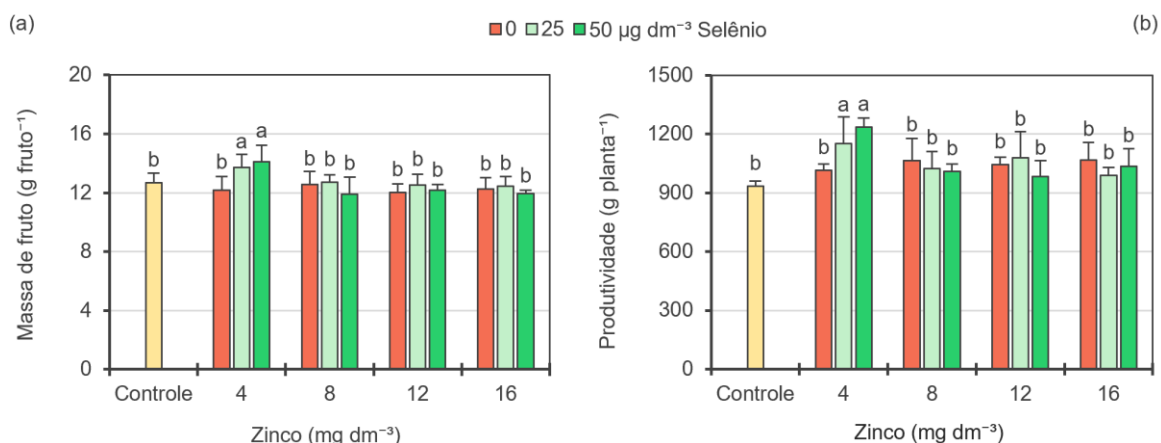
Os dados foram submetidos à análise de normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e à homogeneidade de variância (teste de Bartlett). Em seguida, foi realizada a análise de variância pelo teste F e, quando significativa, as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott. A correlação de Pearson foi utilizada para analisar as relações entre as variáveis estudadas. Todas as análises foram realizadas com um nível de significância de 5% no software R 4.2.1 (R Core Team, 2020).

3 RESULTADOS

3.1 Componentes de produção e parâmetros físicos

A aplicação de Se e Zn influenciou positivamente na massa de fruto (Figura 1a), proporcionando maior produção (Figura 1b). A adição de 4 mg dm^{-3} de Zn combinada com 25 e $50 \mu\text{g dm}^{-3}$ de Se aumentou, respectivamente, em 7,35% e 10,13% a massa de fruto, resultando em incremento de 18,95% e 24,48% na produtividade, quando comparadas ao controle. Contudo, não houve efeito no número de frutos, com média de 84 ± 7 frutos por planta. Em relação às características físicas do tomate, não houve diferença significativa ($p \leq 0,05$) em função das doses de Se e Zn (Tabela 2, Apêndice A). Os valores médios obtidos foram $24,35 \pm 1,44 \text{ mm}$ (diâmetro), $35,02 \pm 2,08 \text{ mm}$ (comprimento), $4,95 \pm 0,29 \text{ N}$ (Firmeza) e parâmetros de cor (L^* : $46,43 \pm 0,61$, C^* : $45,14 \pm 1,46$ e $^{\circ}\text{h}$: $45,03 \pm 0,88$).

Figura 1 - Massa de fruto (a) e produtividade (b) em função da aplicação de Se e Zn em tomateiro cv. Sweet Heaven. Colunas com letras diferentes diferem pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).



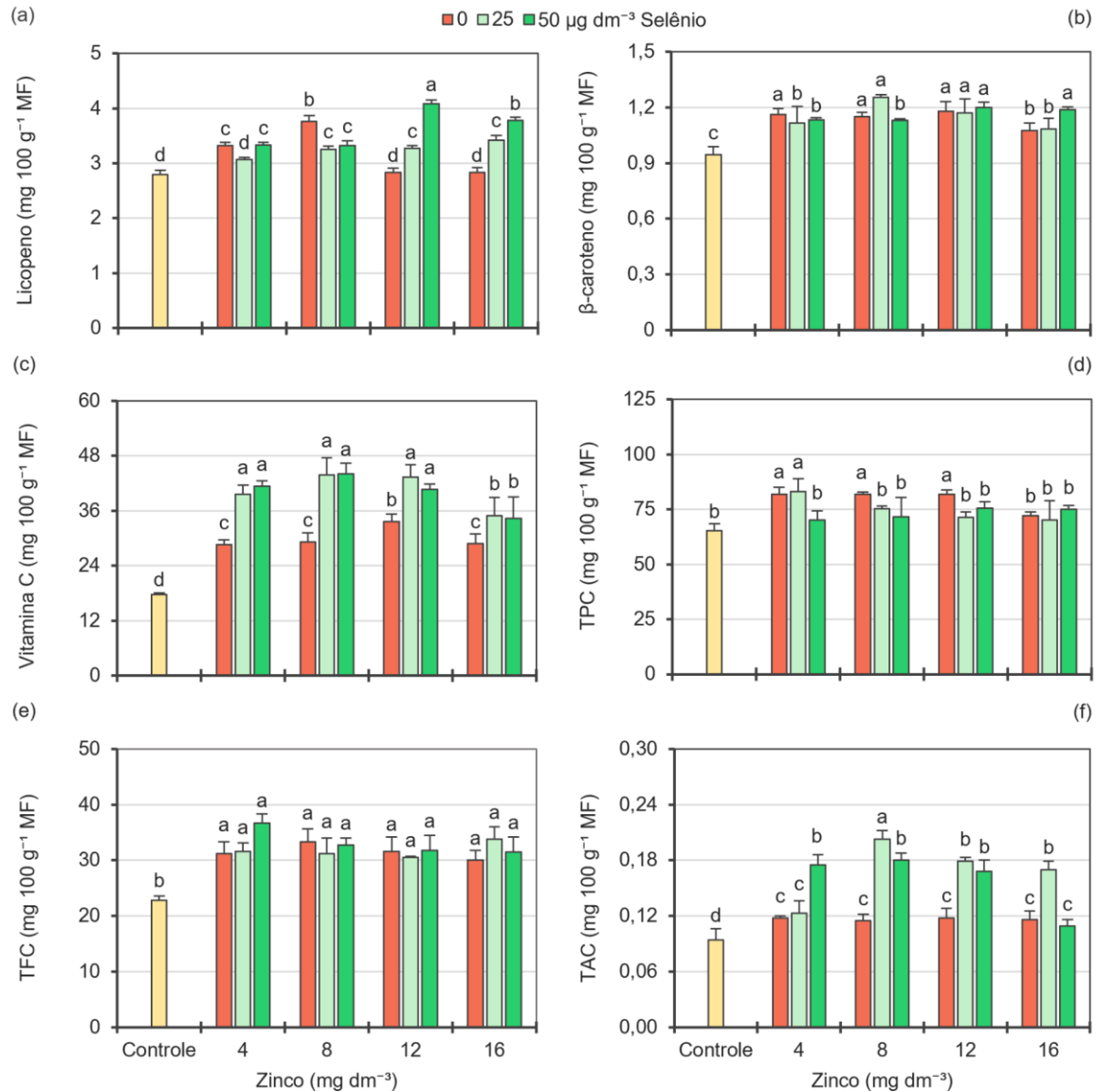
Fonte: Do autor (2024).

3.2 pH, sólidos solúveis, acidez titulável e compostos bioativos

Como mostrado na Tabela 3, do Apêndice A, a aplicação de Se e Zn não afetaram o pH, sólidos solúveis (SS), acidez titulável (AT) e relação SS/AT no tomate, com médias de $4,31 \pm 0,06$ (pH), $7,97 \pm 0,81\%$ (SS), $0,48 \pm 0,06\%$ de ácido cítrico (AT) e $16,89 \pm 2,26$ (SS/TA). Em relação aos compostos bioativos, os teores de β -caroteno, vitamina C, flavonóides totais e antocianinas totais aumentaram independentemente da dose de Se e Zn aplicada, em comparação ao tratamento controle (Figura 2).

A maior concentração de licopeno ($4,08 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ MF}$) foi verificada com a aplicação de $50 \text{ } \mu\text{g dm}^{-3}$ de Se e 12 mg dm^{-3} de Zn (Figura 2a). Além disso, a dose de 12 mg dm^{-3} de Zn aumentou em 20% o teor de β -caroteno, independentemente da dose de Se aplicada, quando comparada ao controle (Figura 2b). Em relação ao teor de vitamina C, a adição de Se aumentou o teor de vitamina C, independentemente da dose de Zn utilizada (Figura 2c). Contudo, a aplicação de Zn aumentou os teores de fenólicos totais (Figura 2d). Quanto ao teor de antocianinas totais, a adição de $25 \text{ } \mu\text{g dm}^{-3}$ de Se juntamente com 8 mg dm^{-3} de Zn aumentou em 53,69% o seu teor no tomate, quando comparado ao tratamento sem aplicação destes elementos (Figura 2f).

Figura 2 - Teores de licopeno (a), teor de β -caroteno (b), vitamina C (c), teor de fenólicos totais (d), teor de flavonóides totais (e) e teor de antocianinas totais (f) em tomate fresco cv. Sweet Heaven. Colunas com letras diferentes diferem pelo teste de Scott-Knott ($n = 3$, $p \leq 0,05$).



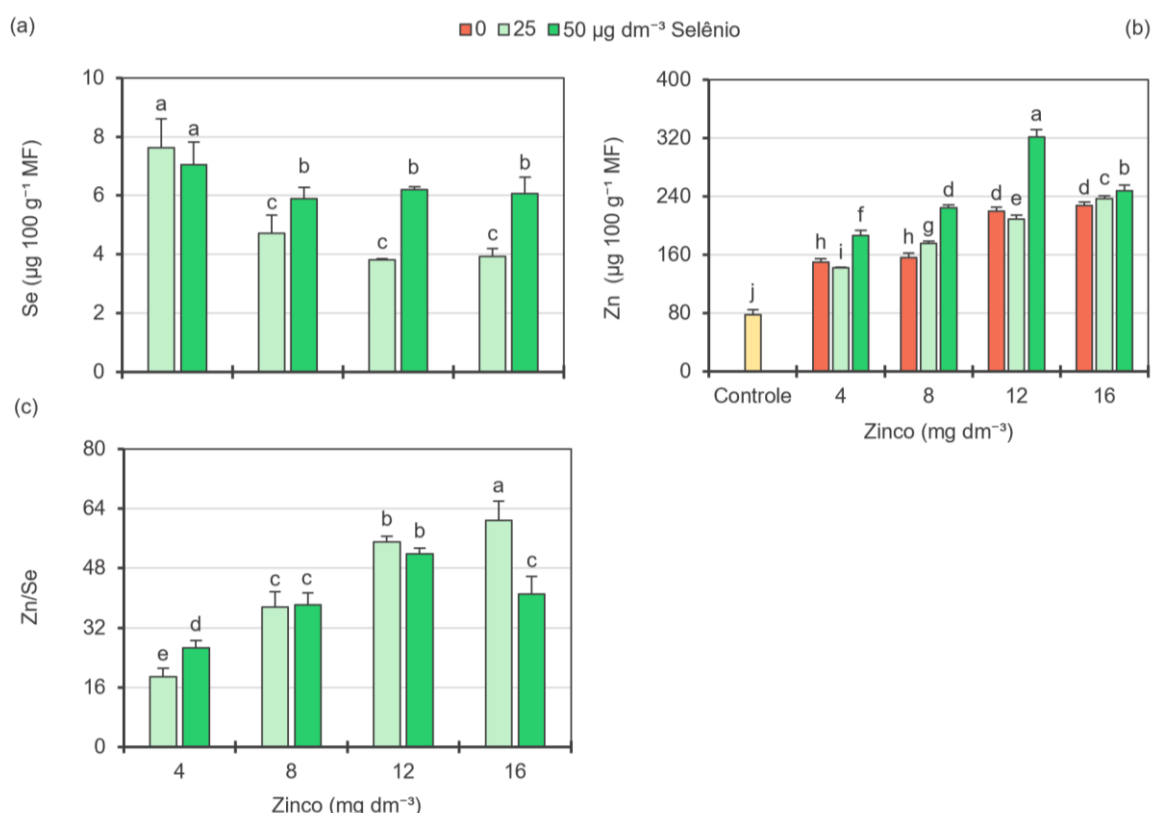
Fonte: Do autor (2024).

3.3 Composição de nutrientes e Se no tomate fresco

A adição de Se aumentou significativamente o teor do elemento no tomate (Figura 3a). Contudo, doses superiores a 4 mg dm^{-3} de Zn reduziram o teor do Se nos frutos, enquanto aumentou a relação Zn/Se (Figura 3c). Em relação ao Zn, a adição de $50 \mu\text{g dm}^{-3}$ de Se aumentou o teor de Zn nos frutos, quando comparada a aplicação de Zn isoladamente (Figura

3b). Além disso, a adição de $50 \mu\text{g dm}^{-3}$ de Se combinada com 12 mg dm^{-3} de Zn aumentou em 75,80% o teor de Zn no tomate, quando comparado ao tratamento controle.

Figura 3 - Teor de selênio (a), teor de zinco (b) e relação Zn/Se (c) em tomate fresco. Colunas com letras diferentes diferem pelo teste de Scott-Knott ($n = 3$, $p \leq 0,05$).



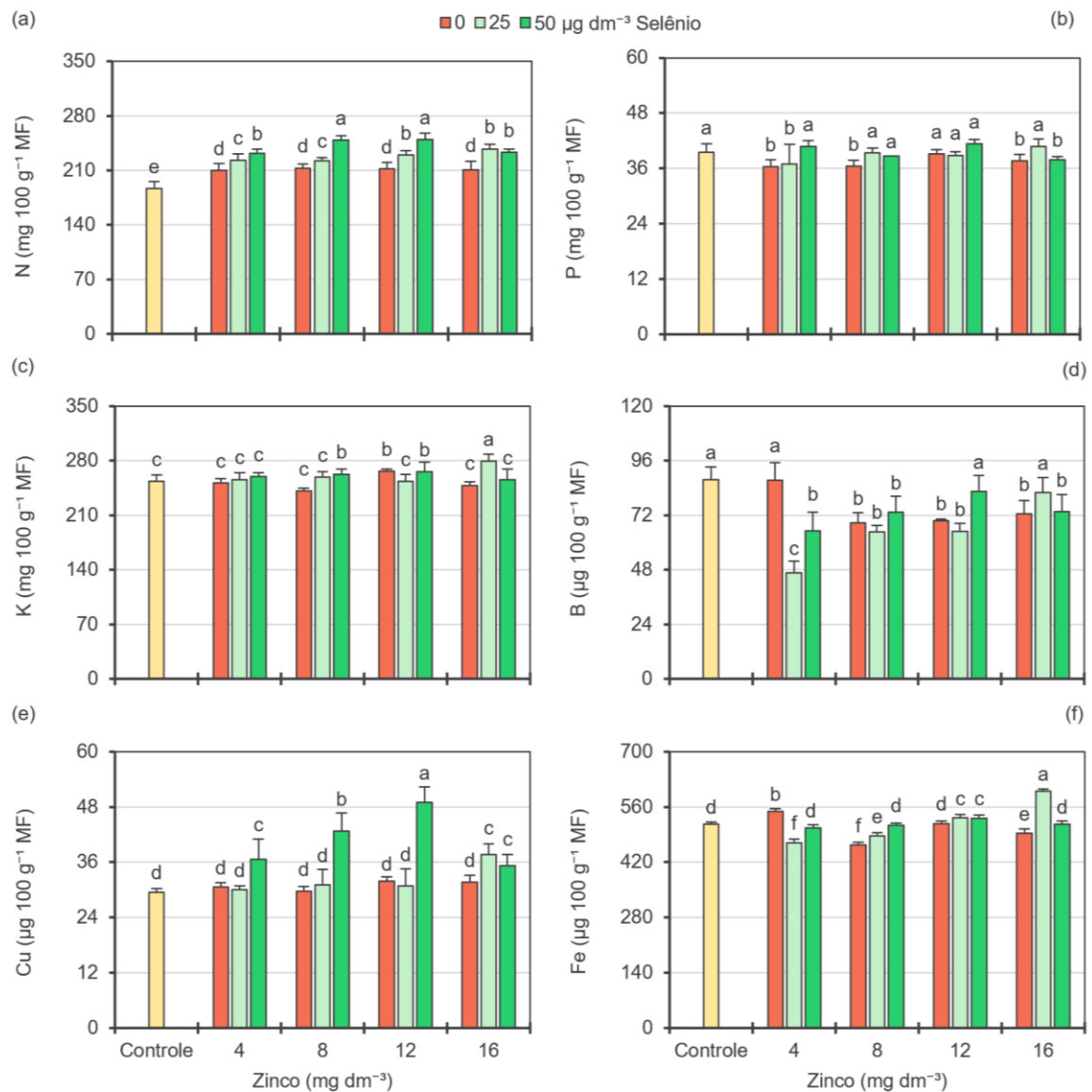
Fonte: Do autor (2024).

Em relação aos macronutrientes, a aplicação de Se e Zn não teve efeito sobre os teores de Ca, Mg e S (Tabela 4, apêndice A). Os teores médios obtidos foram, em mg 100 g^{-1} MF, de $8,98 \pm 1,07$ (Ca), $12,69 \pm 0,96$ (Mg) e $14,33 \pm 1,29$ (S). Por outro lado, foi observado maior teor de N ($248,70 \pm 5,66 \text{ mg 100 g}^{-1}$ MF) com a adição de $50 \mu\text{g dm}^{-3}$ de Se combinado com 8 mg dm^{-3} de Zn, representando um incremento de 24,89% em relação ao controle (Figura 4a). Em relação ao teor de P, houve ligeira redução devido à aplicação de Zn (Figura 4b). Enquanto o teor de K aumentou 9,35% com a aplicação simultânea de $25 \mu\text{g dm}^{-3}$ de Se e 16 mg dm^{-3} de Zn, comparado ao tratamento sem a aplicação dos elementos (Figura 4c).

Quanto aos micronutrientes, não foi observado efeito dos tratamentos sobre o teor de Mn, com teor médio de $115,45 \pm 12,08 \mu\text{g 100 g}^{-1}$ MF (Tabela 4, Apêndice A). De modo geral, houve uma redução no teor de B em função da adição de Se e aumento das doses de Zn (Figura 4d). Por outro lado, a aplicação de $50 \mu\text{g dm}^{-3}$ de Se combinada com 12 mg dm^{-3} de Zn aumentou

o teor de Cu em 39,88%, enquanto o maior teor de Fe foi alcançado com a aplicação simultânea de 25 $\mu\text{g dm}^{-3}$ de Se e 16 mg dm^{-3} de Zn, representando um incremento de 13,83% (Figura 4e e 4f).

Figura 4 - Teor de nitrogênio (a), fósforo (b), potássio (c), boro (d), cobre (e) e ferro (f) em tomate fresco cv. Sweet Heaven. Colunas com letras diferentes diferem pelo teste de Scott-Knott ($n = 3$, $p \leq 0,05$).

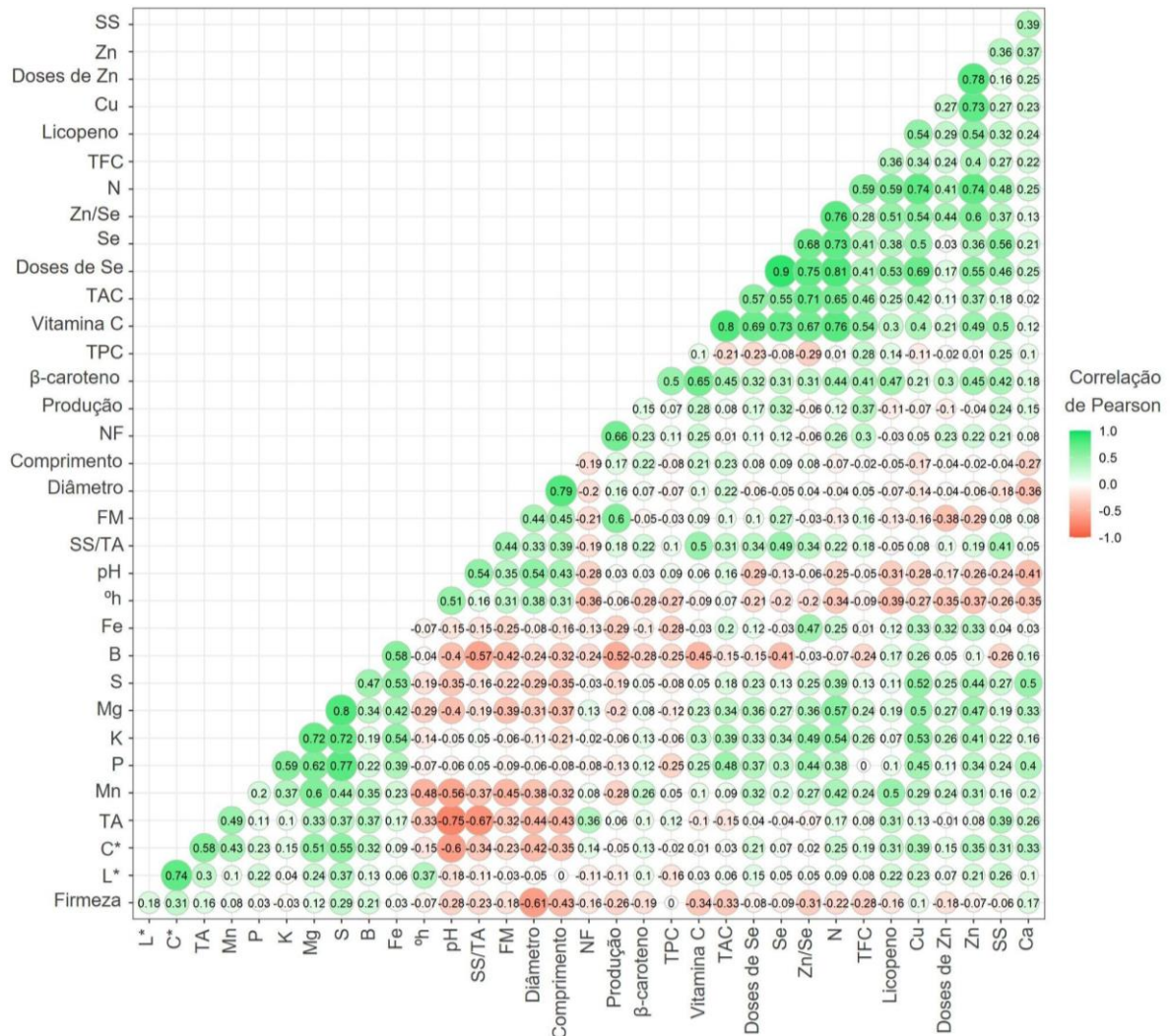


Fonte: Do autor (2024).

3.4 Correlação de Pearson

A correlação de Pearson (Figura 5) das variáveis estudadas com a aplicação de diferentes doses de Se e Zn, mostrou que houve uma correlação positiva entre o teor de Se e o teor de N (0,73), relação Zn/Se (0,68) e teor de vitamina C (0,73) no tomate. As doses de Se correlacionaram positivamente com o teor de Se (0,90), relação Zn/Se (0,75), teor de N (0,81), Cu (0,69) e vitamina C (0,69). Em relação ao Zn, houve correlação positiva entre os teor de Zn nos frutos e os teores de N (0,74) e Cu (0,73), e relação Zn/Se (0,60), enquanto o teor de Zn correlacionou-se positivamente com as doses de Zn (0,78). Não foram verificadas correlações negativas fortes entre os fatores e variáveis estudadas.

Figura 5 - Correlação de Pearson entre as variáveis estudadas.



Fonte: Do autor (2024).

4 DISCUSSÃO

4.1 Efeitos do Se e Zn nos componentes de produção e parâmetros físicos

A produção do tomate depende de diversos fatores para o seu crescimento e desenvolvimento, incluindo o fornecimento de nutrientes. Em nosso estudo, observamos que o fornecimento de Se juntamente com 4 mg dm^{-3} de Zn, embora não tenha aumentado o número de frutos por planta, aumentou a massa dos frutos, o que contribuiu para maior produtividade. Este efeito pode ser atribuído especialmente ao Se, uma vez que maiores teores do elemento nos frutos foram obtidos nesses mesmos tratamentos. O efeito benéfico do Se se deve ao seu efeito como antioxidante, além de atuar como bioestimulador de crescimento, na mitigação de estresse ou induzindo o acúmulo de compostos bioativos nas partes comestíveis (Schiavon *et al.*, 2020; Bano *et al.*, 2021).

Existem alguns estudos sobre o efeito do Se na produtividade do tomateiro. Por exemplo, Hu *et al.*, (2023), Rahim *et al.* (2020) e Sabatino *et al.* (2021) verificaram que a aplicação de Se aumentou o número de frutos por planta, o que resultou em maior produtividade. Por outro lado, Preciado-Rangel *et al.* (2021) avaliaram a aplicação de selenito de sódio em tomateiro cultivado em solução nutritiva e verificaram uma redução de 12,5% na produtividade na maior dose utilizada (8 mg L^{-1}). Gaucin-Delgado *et al.* (2020) estudando as mesmas concentrações, utilizando o selenato de sódio, observaram um ligeiro incremento na produtividade em função da aplicação de Se. Enquanto nenhum efeito foi observado por Pezzarossa *et al.*, (2014).

Em hortaliças, diversos estudos têm relatado maior produtividade em função da aplicação de Se, incluindo cenoura (Huang *et al.*, 2023), pepino (Hu *et al.*, 2022) e morango (Pourebrahimi *et al.*, 2023). Cunha *et al.* (2022) aplicaram Se em amendoim e relatam maior número de vagens e número de sementes, resultando em maior produtividade. Entretanto, a pulverização de selenato de sódio não afetou o peso médio dos bulbos de alho e cebola e, consequentemente, a produtividade (Golubkina *et al.*, 2020). Portanto, esses estudos sugerem que os efeitos do Se na produtividade das culturas estão associados à espécie vegetal, ao método de aplicação, doses e fonte de Se utilizada.

4.2 Efeitos do Se e Zn nos compostos bioativos

Em nosso estudo, a aplicação simultânea de Se e Zn não afetou os parâmetros qualitativos, ou seja, pH, teor de sólidos solúveis, acidez titulável e relação SS/AT, quando

comparadas ao tratamento controle. Entretanto, os valores estão de acordo com os de Constantino *et al.* (2021) para a mesma cultivar. A proporção entre SS e AT é um dos fatores essenciais na determinação do sabor das frutas, influenciando diretamente a percepção de doçura e acidez, além de afetar a aceitação pelos consumidores (Baldwin *et al.*, 2015). Portanto, a alta relação SS/TA observada em nosso estudo está de acordo com as características da cultivar, que apresenta elevada doçura. Além disso, pode-se inferir que a aplicação simultânea de Se e Zn não afetou no sabor do tomate.

Em relação aos compostos bioativos, os teores de β -caroteno, vitamina C, flavonóides totais e antocianinas totais aumentaram em função da adição de Se e Zn, independente da dose aplicada, quando comparadas ao controle. Enquanto, os teores de licopeno e fenólicos totais variaram em função da dose utilizada dos elementos. Zhu *et al.* (2018) observaram um aumento de 1,5 e 1,3 vezes no teor de flavonóides e vitamina C, respectivamente, em tomates tratados com 1 mg L⁻¹ de Se, aplicados via foliar. Contudo, não foram observadas diferenças no teor de licopeno. Resultado similar foi obtido por Pezzarossa *et al.*, (2014), onde a aplicação de 1 mg L⁻¹ de Se não afetou o teor de licopeno, mas resultou em menor teor de β -caroteno no tomate.

Sardar *et al.* (2021) relataram aumento nos teores de vitamina C, fenólicos, flavonóides e carotenóides em tomate em função da aplicação de Zn. Enquanto a aplicação de Se aumentou os teores de vitamina C, fenóis, antocianinas e licopeno, mas não afetou os teores de flavonóides e β -caroteno (Hu *et al.*, 2023). Proteínas envolvidas na via biossintética dos fenilpropanóides, como epimerase dependente de NAD, oxidorreductase desidrogenase dependentes de zinco e acil-CoA sintetase são reguladas positivamente em frutos de tomate enriquecidos com Se, o que pode ter levado a um aumento no teor total de flavonóides (Zhu *et al.*, 2018).

Em nosso estudo, o teor de vitamina C aumentou consideravelmente com a adição de Se. Este resultado está de acordo com estudos anteriores, que relatam aumento do teor de vitamina C em folhas de chá verde (Hu *et al.*, 2003), alface (Ríos *et al.*, 2008) e tomate (Zhu *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2021) tratados com Se. Zhu *et al.* (2017) mostraram que o tomate tratado com Se apresentou maior teor de glutathione (GSH) em comparação com o controle (sem aplicação de Se). A vitamina C funciona sinergicamente com a GSH para fornecer proteção contra danos celulares, enquanto a GSH está envolvida na reciclagem da vitamina C (Fenech *et al.*, 2019), o que pode ter contribuído para maiores concentrações de vitamina C nos tratamentos com Se.

4.3 Efeitos do Se e Zn na biofortificação e composição mineral dos frutos

No que diz respeito à composição mineral, o K foi o macronutriente encontrado em maior concentração no tomate, seguido do N, P, S, Mg e Ca. Enquanto o Fe se destacou entre os micronutrientes, seguido do Zn, Mn, B e Cu. Os minerais são essenciais para a saúde humana, atuando como componentes fundamentais da estrutura óssea, na regulação do equilíbrio hídrico do corpo, composição de hormônios e enzimas e de outros compostos biologicamente ativos (Godswill *et al.*, 2020; Weyh *et al.*, 2022). Na dieta humana, as plantas são as principais fontes destes elementos, entretanto, muitas culturas não contêm naturalmente minerais suficientes para satisfazer as necessidades nutricionais humanas (Ahmed *et al.*, 2024).

Estima-se que a deficiência de Se e Zn afeta cerca de 15% e 30% da população mundial, respectivamente (Avnee *et al.*, 2023). A ingestão adequada de Se é crucial a manter a saúde cardiovascular, melhorar o sistema imunológico e proteger as células de danos provocados por espécies reativas de oxigênio, sendo conhecido como “elemento de longevidade” (Shimada *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2024). Enquanto a deficiência de Zn resulta em perda de apetite, lesões na pele, alteração do paladar e do olfato. Além de aumentar a mortalidade e atraso no crescimento infantil (Singh; Prasad, 2023).

Para humanos adultos, foi estabelecida uma dose dietética recomendada (RDA) de 55 $\mu\text{g dia}^{-1}$ de Se e 11 mg dia^{-1} de Zn (Wesselink *et al.*, 2019; Chasapis *et al.*, 2020). Assim, em nosso estudo, o consumo de 100 gramas de tomate cultivados com a adição de 50 $\mu\text{g dm}^{-3}$ de Se combinada com 12 mg dm^{-3} de Zn poderia satisfazer 11,28% e 2,93% da RDA de Se e Zn, respectivamente. Portanto, esta abordagem de enriquecimento de nutrientes resultou em tomate biofortificado com Se e Zn, podendo contribuir para a ingestão destes elementos pela população.

Além disso, em nosso estudo, a aplicação de Se e Zn teve uma correlação positiva com o teor de N e Cu nos frutos. O Zn está envolvido diretamente no metabolismo do N. Por exemplo, o fornecimento de Zn aumentou as atividades enzimáticas da redutase do nitrito, redutase do nitrato e glutamina sintetase e a quantidade de proteína solúvel em arroz (Ji *et al.*, 2022). Por outro lado, o Se pode atuar no metabolismo do N indiretamente, devido a sua influência no metabolismo do S (Lei *et al.*, 2022; Saeed *et al.*, 2023), ou ainda, aumentando a atividade das enzimas redutase do nitrato, glutamina sintetase e glutamato sintetase (Ríos *et al.*, 2010). Além disso, a correlação entre os teores de N e Cu em nosso estudo reforça a importância

do micronutriente no metabolismo do N, desempenhando papel significativo na biossíntese de clorofila, na fotossíntese e na atividade e como cofator de diversas enzimas (Mir *et al.*, 2021).

Efeitos da aplicação de Se e Zn foram verificados sobre os teores elementares em diversas culturas. Por exemplo, o fornecimento de Se aumentou os teores de K e S em tomate Sabatino *et al.* (2021), K e P em alho (Golubkina *et al.*, 2020) e N em alface (Ríos *et al.*, 2010). Enquanto, nenhum efeito foi observado sobre o teor de N em tomateiro (Rahim *et al.*, 2020) e rabanete (Silva *et al.*, 2020; Cipriano *et al.*, 2022). Por outro lado, altas doses de Zn reduziram os teores de N, P, K e Ca em *Mentha longifolia* L (Barzin *et al.*, 2023), enquanto aumentou os teores de K em milho (Raza *et al.*, 2021). Assim, a forma de aplicação, dose e fonte dos elementos devem ser selecionadas de acordo com a espécie vegetal para assegurar o equilíbrio nutricional das plantas e manutenção da qualidade dos produtos.

5 CONCLUSÃO

A biofortificação simultânea com Se e Zn mostra grande potencial para melhorar a qualidade do tomate, bem como fornecer suplementação dietética de Se em humanos. Em nosso estudo, a aplicação simultânea de $50 \mu\text{g dm}^{-3}$ de Se e 12 mg dm^{-3} de Zn no tomateiro, via solo, aumentou o teor de selênio e zinco nos frutos e melhorou os componentes de qualidade nutricional, incluindo a composição mineral e compostos bioativos. Contudo, a adição de 4 mg dm^{-3} de Zn combinada com Se, independente da dose de Se utilizada, proporcionaram maior produtividade de frutos. Esses resultados sugerem que o fornecimento de Se é importante para enriquecer os frutos devido a baixa disponibilidade do elemento no solo, entretanto, a dose de Zn dependerá da finalidade específica.

REFERÊNCIAS

- AHMED, N. *et al.* Micronutrients and their effects on horticultural crop quality, productivity and sustainability. **Scientia Horticulturae**, v. 323, p. 112512, 2024.
- ALI, M. Y. *et al.* Nutritional composition and bioactive compounds in tomatoes and their impact on human health and disease: A review. **Foods**, v. 10, n. 1, p. 45, 2020.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY (AOAC). **Official Methods of Analysis**. 21. ed. Gaithersburg, 2019.
- AVNEE *et al.* Biofortification: an approach to eradicate micronutrient deficiency. **Frontiers in Nutrition**, v. 10, p. 1233070, 14 set. 2023.
- BALDWIN, E. A.; SCOTT, J. W.; BAI, J. Sensory and chemical flavor analyses of tomato genotypes grown in Florida during three different growing seasons in multiple years. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 140, n. 5, p. 490-503, 2015.
- BANO, I. *et al.* Uses of selenium nanoparticles in the plant production. **Agronomy**, v. 11, n. 11, p. 2229, 2021.
- BARRETO, R. F. *et al.* Response of photomorphogenic tomato mutants to nutrient omissions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 43, n. 7, p. 105, 2021.
- CANTARELLA, H. ; QUAGGIO, J.A. ; MATTOS JR., D. ; BOARETTO, R. M. ; RAIJ, B. Van . **Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 1. ed.Campinas: Instituto Agrônômico, 2022. v. 1. 489p.
- BARZIN, G.; AZADNAFS, N.; BISHEHKOLAEI, R. Effect of calcium on improving zinc tolerance in hydroponically grown *Mentha longifolia* L. through modulation of metabolic pathways and ion homeostasis. **Brazilian Journal of Botany**, p. 1-13, 2023.
- CAKMAK, I. *et al.* Fate and bioaccessibility of iodine in food prepared from agronomically biofortified wheat and rice and impact of cofertilization with zinc and selenium. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 68, n. 6, p. 1525-1535, 2020.
- CHASAPIS, C. T. *et al.* Recent aspects of the effects of zinc on human health. **Archives of Toxicology**, v. 94, p. 1443-1460, 2020.
- CHAUDHARY, P. *et al.* Bioactivities of phytochemicals present in tomato. **Journal of Food Science and Technology**, v. 55, p. 2833-2849, 2018.
- CIPRIANO, P. E. *et al.* Macronutrients content of radishes and the influence of biofortification with selenium. **Scientia Horticulturae**, v. 296, p. 110908, 2022.
- CONSTANTINO, L. V. *et al.* Physico-biochemical characterization of mini-tomatoes and internal preference mapping based on consumer acceptance. **Scientia Horticulturae**, v. 282, p. 110034, 2021.

CUNHA, M. L. O. *et al.* Selenium increases photosynthetic capacity, daidzein biosynthesis, nodulation and yield of peanuts plants (*Arachis hypogaea* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 190, p. 231-239, 2022.

CUNHA, M. L. O. *et al.* Selenium promotes hormesis in physiological, biochemical, and biological nitrogen fixation traits in cowpea plants. **Plant and Soil**, p. 1-18, 2024.

DAI, H; WEI, S; TWARDOWSKA, I. Biofortification of soybean (*Glycine max* L.) with Se and Zn, and enhancing its physiological functions by spiking these elements to soil during flowering phase. **Science of the Total Environment**, v. 740, p. 139648, 2020.

DANSO, O. P. *et al.* Selenium biofortification: Strategies, progress and challenges. **Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 416, 2023.

DUBORSKÁ, E. *et al.* Current strategies for selenium and iodine biofortification in crop plants. **Nutrients**, v. 14, n. 22, p. 4717, 2022.

FENECH, M. *et al.* Vitamin C content in fruits: Biosynthesis and regulation. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 413553, 2019.

FRASER, G. E. *et al.* Tomato consumption and intake of lycopene as predictors of the incidence of prostate cancer: the Adventist Health Study-2. **Cancer Causes & Control**, v. 31, n. 4, p. 341-351, 2020.

GAUCIN-DELGADO, J. M. *et al.* Agronomic biofortification with selenium improves the yield and nutraceutical quality in tomato under soilless conditions. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 48, n. 3, p. 1221-1232, 2020.

GENCHI, G. *et al.* Biological activity of selenium and its impact on human health. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 3, p. 2633, 2023.

GERM, M. *et al.* Impact of double Zn and Se biofortification of wheat plants on the element concentrations in the grain. **Plant, Soil and Environment**, v. 59, n. 7, p. 316-321, 2013.

GIL, J. D. B. *et al.* Sustainable development goal 2: Improved targets and indicators for agriculture and food security. **Ambio**, v. 48, n. 7, p. 685-698, 2019.

GIUSTI, M. M.; WROLSTAD, R. E. Anthocyanins. Characterization and measurement with UV-visible spectroscopy. **Current Protocols in Food Analytical Chemistry**, v. 1, p. 1-13, 2001.

GODSWILL, A. G. *et al.* Health benefits of micronutrients (vitamins and minerals) and their associated deficiency diseases: A systematic review. **International Journal of Food Sciences**, v. 3, n. 1, p. 1-32, 2020.

GOLUBKINA, N. *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on yield, biochemical characteristics, and elemental composition of garlic and onion under selenium supply. **Plants**, v. 9, n. 1, p. 84, 2020.

HARDING, K. L.; AGUAYO, V. M.; WEBB, P. Hidden hunger in South Asia: a review of recent trends and persistent challenges. **Public Health Nutrition**, v. 21, n. 4, p. 785-795, 2018.

HU, Q.; XU, J.; PANG, G. Effect of selenium on the yield and quality of green tea leaves harvested in early spring. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 11, p. 3379-3381, 2003.

HU, W. *et al.* Effect of foliar application of silicon and selenium on the growth, yield and fruit quality of tomato in the field. **Horticulturae**, v. 9, n. 10, p. 1126, 2023.

HU, W. *et al.* Foliar application of silicon and selenium improves the growth, yield and quality characteristics of cucumber in field conditions. **Scientia Horticulturae**, v. 294, p. 110776, 2022.

HUANG, S. *et al.* Effect of bio-nano-selenium on yield, nutritional quality and selenium content of radish. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 115, p. 104927, 2023.

JL, C. *et al.* Zinc and nitrogen synergistic act on root-to-shoot translocation and preferential distribution in rice. **Journal of Advanced Research**, v. 35, p. 187-198, 2022.

KAUR, H.; GARG, N. Zinc toxicity in plants: a review. **Planta**, v. 253, n. 6, p. 129, 2021.

KHAN, S. T. *et al.* The enormity of the zinc deficiency problem and available solutions; an overview. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 15, n. 3, p. 103668, 2022.

LEI, Z. *et al.* Selenium enhanced nitrogen accumulation in legumes in soil with rhizobia bacteria. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, p. 134960, 2022.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas; princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1989. 319 p.

MANGUEZE, A. V. J. *et al.* Simultaneous zinc and selenium biofortification in rice. Accumulation, localization and implications on the overall mineral content of the flour. **Journal of Cereal Science**, v. 82, p. 34-41, 2018.

MAO, H. *et al.* Using agronomic biofortification to boost zinc, selenium, and iodine concentrations of food crops grown on the loess plateau in China. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 14, n. 2, p. 459-470, 2014.

MIR, A. R.; PICHTEL, J.; HAYAT, S. Copper: uptake, toxicity and tolerance in plants and management of Cu-contaminated soil. **Biometals**, v. 34, n. 4, p. 737-759, 2021.

NAGATA, M; YAMASHITA, I. Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. **Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi**, v. 39, n. 10, p. 925-928, 1992.

NATASHA, N. *et al.* Zinc in soil-plant-human system: A data-analysis review. **Science of the Total Environment**, v. 808, p. 152024, 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Objetivos de Desenvolvimento**

Sustentável (ODS). 2024. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em 11 jun. 2024.

PEZZAROSSA, B. *et al.* Effects of Se-enrichment on yield, fruit composition and ripening of tomato (*Solanum lycopersicum*) plants grown in hydroponics. **Scientia Horticulturae**, v. 165, p. 106-110, 2014.

POBLACIONES, M. J.; RENGEL, Z. Combined foliar selenium and zinc biofortification in field pea (*Pisum sativum*): accumulation and bioavailability in raw and cooked grains. **Crop and Pasture Science**, v. 68, n. 3, p. 265-271, 2017.

POUREBRAHIMI, M. *et al.* Effect of combined application of selenium and hydrogen sulfide under salinity stress on yield, physiological traits and biofortification of strawberries in hydroponic cultivation. **Scientia Horticulturae**, v. 315, p. 111982, 2023.

PRAHARAJ, S. *et al.* Zinc biofortification in food crops could alleviate the zinc malnutrition in human health. **Molecules**, v. 26, n. 12, p. 3509, 2021.

PRECIADO-RANGEL, P. *et al.* Biofortification with selenium increases bioactive compounds and antioxidant capacity in tomato fruits. **Terra Latinoamericana**, v. 39, 2021.

PROM-U-THAI, C. *et al.* Simultaneous biofortification of rice with zinc, iodine, iron and selenium through foliar treatment of a micronutrient cocktail in five countries. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 589835, 2020.

RAHIM, F. P. *et al.* Agronomic biofortification with selenium in tomato crops (*Solanum lycopersicon* L. mill). **Agriculture**, v. 10, n. 10, p. 486, 2020.

RAZA, H. M. A. *et al.* Potassium and zinc co-fertilization provides new insights to improve maize (*Zea mays* L.) physiology and productivity. **Pakistan Journal of Botany**, v. 53, n. 6, p. 2059–2065. 2021

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2020. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em 11 jun. 2024.

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

RÍOS, J. J. *et al.* Response of nitrogen metabolism in lettuce plants subjected to different doses and forms of selenium. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 90, n. 11, p. 1914-1919, 2010.

RÍOS, J. J. *et al.* Biofortification of Se and induction of the antioxidant capacity in lettuce plants. **Scientia Horticulturae**, v. 116, n. 3, p. 248-255, 2008.

SABATINO, L. *et al.* Selenium biofortification and grafting modulate plant performance and functional features of cherry tomato grown in a soilless system. **Scientia Horticulturae**, v. 285, p. 110095, 2021.

SAEED, K. *et al.* The Interplay of Sulfur and Selenium Enabling Variations in Micronutrient Accumulation in Red Spinach. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 16, p. 12766, 2023.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acesso em 11 jun. 2024.

SARDAR, H. *et al.* Effect of foliar application of zinc oxide on growth and photosynthetic traits of cherry tomato under calcareous soil conditions. **Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus**, v. 20, n. 1, p. 91-99, 2021.

SHIMADA, B. K.; ALFULAIJ, N.; SEALE, L. A. The impact of selenium deficiency on cardiovascular function. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 19, p. 10713, 2021.

SILVA, D. F. *et al.* Biofortification with selenium and implications in the absorption of macronutrients in *Raphanus sativus* L. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 86, p. 103382, 2020.

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

SILVA JÚNIOR, E. C. *et al.* Natural variation of selenium in Brazil nuts and soils from the Amazon region. **Chemosphere**, v. 188, p. 650-658, 2017.

SINGH, P.; PRASAD, S. A review on iron, zinc and calcium biological significance and factors affecting their absorption and bioavailability. **Journal of Food Composition and Analysis**, p. 105529, 2023.

STROHECKER, R. ZARAGOZA, F. M., HENNING, H. M. **Análisis de vitaminas: Métodos comprobados**. Paz Montalvo, Madrid. 1967.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>. Acesso em 11 jun. 2024.

TOHIDI, B; RAHIMMALEK, M; ARZANI, A. Essential oil composition, total phenolic, flavonoid contents, and antioxidant activity of Thymus species collected from different regions of Iran. **Food Chemistry**, v. 220, p. 153-161, 2017.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Microwave assisted acid digestion of sediments, sludge, soils and oils. **Method 3051A Revision**, v. 1, p. 1-30, 2007.

WESSELINK, E. *et al.* Feeding mitochondria: Potential role of nutritional components to improve critical illness convalescence. **Clinical Nutrition**, v. 38, n. 3, p. 982-995, 2019.

WEYH, C. *et al.* The role of minerals in the optimal functioning of the immune system. **Nutrients**. 2022; 14: 644. 2022.

XU, S. *et al.* The synergistic effects of silicon and selenium on enhancing salt tolerance of maize plants. **Environmental and Experimental Botany**, v. 187, p. 104482, 2021.

XU, X. *et al.* Effects of selenium fertilizer application and tomato varieties on tomato fruit quality: A meta-analysis. **Scientia Horticulturae**, v. 304, p. 111242, 2022.

XUE, M. *et al.* Effects of selenium combined with zinc amendment on zinc fractions and bioavailability in calcareous soil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 190, p. 110082, 2020.

YANG, H. *et al.* The beneficial and hazardous effects of selenium on the health of the soil-plant-human system: An overview. **Journal of Hazardous Materials**, v. 422, p. 126876, 2022b.

YANG, L. *et al.* Selenium concentration is associated with occurrence and diagnosis of three cardiovascular diseases: A systematic review and meta-analysis. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 70, p. 126908, 2022a.

YOUNAS, N. *et al.* Alleviation of zinc deficiency in plants and humans through an effective technique; biofortification: A detailed review. **Acta Ecologica Sinica**, v. 43, n. 3, p. 419-425, 2023.

ZHU, Z. *et al.* Exploring the effects of selenium treatment on the nutritional quality of tomato fruit. **Food Chemistry**, v. 252, p. 9-15, 2018.

ZHU, Z. *et al.* Selenium delays tomato fruit ripening by inhibiting ethylene biosynthesis and enhancing the antioxidant defense system. **Food Chemistry**, v. 219, p. 179-184, 2017.

ZITHA, E. Z. M. *et al.* Changes in the bioactive compounds and antioxidant activity in red-fleshed dragon fruit during its development. **Scientia Horticulturae**, v. 291, p. 110611, 2022.

ZOU, C. *et al.* Simultaneous biofortification of wheat with zinc, iodine, selenium, and iron through foliar treatment of a micronutrient cocktail in six countries. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 67, n. 29, p. 8096-8106, 2019.

APÊNDICE A

Tabela 2 - Caracterização física de tomate em função da aplicação simultânea de Se e Zn.

Tratamentos	NF ^{ns}	Diâmetro ^{ns}	Comprimento ^{ns}	Firmeza ^{ns}	L* ^{ns}	C* ^{ns}	h ^{ns}
Controle	74 ± 3	23,84 ± 3,97	34,19 ± 4,11	5,26 ± 0,57	46,29 ± 0,44	44,33 ± 0,64	45,68 ± 0,69
0	4	84 ± 5	24,12 ± 0,78	34,65 ± 2,04	5,13 ± 0,03	46,38 ± 0,44	45,60 ± 1,30
	8	85 ± 5	24,80 ± 0,30	34,62 ± 1,26	4,67 ± 0,24	46,40 ± 0,35	45,09 ± 0,53
	12	87 ± 1	24,08 ± 0,64	34,21 ± 0,83	5,06 ± 0,09	46,37 ± 0,71	45,04 ± 1,17
	16	87 ± 8	24,65 ± 1,06	35,57 ± 2,99	5,07 ± 0,09	46,57 ± 0,48	45,57 ± 1,72
25	4	84 ± 5	24,53 ± 1,50	35,45 ± 1,76	4,95 ± 0,28	46,16 ± 1,57	44,03 ± 2,44
	8	81 ± 8	24,71 ± 0,78	37,01 ± 0,82	4,88 ± 0,12	46,59 ± 0,58	45,13 ± 2,22
	12	86 ± 12	24,93 ± 0,47	34,95 ± 0,51	4,62 ± 0,24	45,88 ± 0,09	44,32 ± 0,74
	16	80 ± 2	24,69 ± 0,82	34,57 ± 1,37	4,71 ± 0,31	46,45 ± 0,99	44,97 ± 1,00
50	4	88 ± 8	24,70 ± 2,54	35,99 ± 3,30	4,91 ± 0,24	46,73 ± 0,37	45,73 ± 1,56
	8	85 ± 6	24,63 ± 1,34	34,76 ± 2,41	4,94 ± 0,14	46,35 ± 0,31	45,28 ± 1,65
	12	81 ± 5	23,90 ± 1,31	34,84 ± 2,43	5,11 ± 0,33	46,91 ± 0,71	46,76 ± 0,94
	16	87 ± 7	22,99 ± 1,61	34,42 ± 3,18	5,05 ± 0,39	46,55 ± 0,33	46,04 ± 1,26
Média	84 ± 7	24,35 ± 0,54	35,02 ± 2,08	4,95 ± 0,29	46,43 ± 0,60	45,14 ± 1,47	45,03 ± 0,88

Se (0, 25 e 50 µg dm⁻³); Zn (4, 8, 12, 16 mg dm⁻³); número de frutos (NF, por planta); massa de fruto (MF, g planta⁻¹); diâmetro e comprimento (mm); firmeza (N); luminosidade (L*); cromaticidade (C*) e ângulo Hue (h*). Não significativo (ns) pelo teste de Scott-Knott (n = 3, p ≤ 0,05).

Fonte: Do autor (2024).

Tabela 3 - Caracterização Bioquímica de tomate em função da aplicação simultânea de Se e Zn.

Tratamentos		pH ^{ns}	SS ^{ns}	AT ^{ns}	SS/AT ^{ns}
Controle		4,32 ± 0,03	6,67 ± 0,33	0,45 ± 0,02	14,67 ± 0,33
0	4	4,29 ± 0,05	8,00 ± 0,00	0,56 ± 0,05	14,67 ± 1,40
	8	4,32 ± 0,02	7,33 ± 0,33	0,52 ± 0,04	14,27 ± 0,43
	12	4,33 ± 0,02	8,00 ± 0,58	0,48 ± 0,04	16,60 ± 0,33
	16	4,32 ± 0,03	7,33 ± 0,67	0,43 ± 0,04	17,27 ± 1,12
25	4	4,36 ± 0,01	9,00 ± 0,58	0,43 ± 0,02	20,70 ± 0,53
	8	4,35 ± 0,02	8,00 ± 0,00	0,46 ± 0,02	17,63 ± 0,58
	12	4,36 ± 0,01	8,00 ± 0,00	0,43 ± 0,01	18,33 ± 0,23
	16	4,32 ± 0,03	8,00 ± 0,00	0,48 ± 0,03	16,68 ± 0,89
50	4	4,31 ± 0,06	8,33 ± 0,33	0,48 ± 0,08	18,02 ± 2,30
	8	4,28 ± 0,05	7,67 ± 0,33	0,48 ± 0,04	16,20 ± 1,33
	12	4,29 ± 0,02	8,67 ± 0,33	0,49 ± 0,02	17,89 ± 1,12
	16	4,21 ± 0,03	8,67 ± 0,33	0,53 ± 0,04	16,58 ± 0,71
Média		4,31 ± 0,06	7,97 ± 0,81	0,48 ± 0,06	16,89 ± 2,26

Se (0, 25 e 50 µg dm⁻³); Zn (4, 8, 12, 16 mg dm⁻³); sólidos solúveis (%); acidez titulável (% de ácido cítrico); relação SS/AT. Não significativo (ns) pelo teste de Scott-Knott (n = 3, p ≤ 0,05).

Fonte: Do autor (2024).

Tabela 4 - Composição de nutrientes de tomate fresco em função da aplicação simultânea de Se e Zn.

Tratamentos		Ca ^{ns}	Mg ^{ns}	S ^{ns}	Mn ^{ns}
Controle		8,47 ± 1,12	12,28 ± 0,78	14,38 ± 0,45	108,70 ± 8,37
0	4	8,22 ± 0,16	12,30 ± 1,04	14,13 ± 1,27	121,53 ± 10,58
	8	8,81 ± 0,40	11,73 ± 0,13	12,75 ± 0,48	115,59 ± 15,26
	12	9,32 ± 1,58	13,11 ± 1,02	15,10 ± 1,16	109,96 ± 10,28
	16	9,21 ± 1,31	12,35 ± 0,97	14,28 ± 1,26	106,35 ± 12,07
25	4	8,70 ± 1,59	11,99 ± 1,15	13,18 ± 2,21	104,46 ± 18,27
	8	8,50 ± 0,65	12,59 ± 0,31	13,70 ± 0,21	114,96 ± 6,21
	12	8,66 ± 0,54	12,19 ± 0,69	13,38 ± 1,36	110,12 ± 8,92
	16	8,93 ± 0,80	13,70 ± 0,75	15,86 ± 0,78	121,16 ± 4,54
50	4	9,93 ± 1,22	13,02 ± 0,58	14,93 ± 1,29	114,31 ± 9,01
	8	8,01 ± 0,46	13,19 ± 1,29	14,31 ± 0,83	117,24 ± 12,41
	12	10,09 ± 0,64	13,63 ± 1,22	15,83 ± 0,56	121,14 ± 10,83
	16	9,84 ± 0,64	12,93 ± 1,02	14,45 ± 0,31	135,28 ± 8,43
Média		8,98 ± 1,07	12,69 ± 0,96	14,33 ± 1,29	115,46 ± 12,08

Se (0, 25 e 50 µg dm⁻³); Zn (4, 8, 12, 16 mg dm⁻³); teor de cálcio (Ca); teor de magnésio (Mg) e enxofre (S) em mg por 100 g de peso fresco; teor de manganês (Mn) em µg por 100 g de peso fresco. Não significativo (ns) pelo teste de Scott-Knott (n = 3, p ≤ 0,05).

Fonte: Do autor (2024).

TERCEIRA PARTE

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A biofortificação do tomate com selênio (Se) e zinco (Zn) pode contribuir para aumentar a ingestão desses nutrientes pela população, reduzindo a incidência de doenças relacionadas à deficiência desses elementos. Os resultados mostraram que o tomate pode ser biofortificado com Se, desde que este elemento seja fornecido em baixas concentrações. Em relação ao Zn, o primeiro estudo, ao avaliar a aplicação de Zn isoladamente, sugere que novas abordagens devem ser estudadas para aumentar o teor do nutriente no tomate.

Em relação à biofortificação simultânea com Se e Zn, os resultados mostraram que essa estratégia apresenta grande potencial para melhorar a qualidade do tomate, bem como fornecer suplementação dietética de Se e Zn em humanos. Além de aumentar o teor de Se e Zn nos frutos, os resultados mostraram melhoria nos componentes de qualidade nutricional, incluindo a composição mineral e substâncias bioativas. Contudo, doses menores de Zn foram suficientes para alcançar a máxima produtividade.

Nossos resultados sugerem que o fornecimento de Se é importante para enriquecer os frutos devido à baixa disponibilidade do elemento no solo; entretanto, a dose de Zn dependerá da finalidade específica, devendo levar em consideração o potencial de investimento do produtor e o objetivo da produção. Além disso, estudos mais detalhados são necessários para compreender o efeito da aplicação de Se e Zn no conteúdo de compostos bioativos e de macro e micronutrientes nos frutos, especialmente considerando a biofortificação do tomateiro com esses elementos.