

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

**PAPEL BENÉFICO DO SELÊNIO EM CANA-DE-AÇÚCAR:  
EFEITOS FISIOLÓGICOS, BIOQUÍMICOS E  
PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA**

**Marcio Souza da Silva**  
**Engenheiro Agrônomo**

**2023**

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

**PAPEL BENÉFICO DO SELÊNIO EM CANA-DE-AÇÚCAR:  
EFEITOS FISIOLÓGICOS, BIOQUÍMICOS E  
PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA**

**Discente: Marcio Souza da Silva**

**Orientador: Prof. Dr. André Rodrigues dos Reis**

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

**2023**

S586p

Silva, Marcio Souza da

Papel benéfico do selênio em cana-de-açúcar: efeitos fisiológicos, bioquímicos e produtividade agrícola / Marcio Souza da Silva. -- Jaboticabal, 2023

174 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: André Rodrigues dos Reis

1. estresses abióticos. 2. Setor sucoenergético. 3. Sacarose. 4. Metabolismo antioxidante. 5. Nutrição de plantas. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: PAPEL BENÉFICO DO SELÊNIO EM CANA-DE-AÇÚCAR: EFEITOS FISIOLÓGICOS, BIOQUÍMICOS E PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA

**AUTOR: MARCIO SOUZA DA SILVA**

**ORIENTADOR: ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
**ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS**  
Data: 31/05/2023 10:25:17-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Documento assinado digitalmente  
**RENAN CALDAS UMBURANAS**  
Data: 04/05/2023 10:04:18-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia de Biossistemas / FEI UNESP Tupa

Documento assinado digitalmente  
**ELCIO FERREIRA DOS SANTOS**  
Data: 03/06/2023 08:22:58-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. ELCIO FERREIRA DOS SANTOS (Participação Virtual)  
Departamento de Agronomia / Instituto Federal de Mato Grosso do Sul - IFMS Nova Andradina/MS

Prof. Dr. RENAN CALDAS UMBURANAS (Participação Virtual)  
Departamento de Produção Vegetal / Escola Superior de Agricultura ESALQ/USP

Documento assinado digitalmente  
**JOSE LAVRES JUNIOR**  
Data: 02/06/2023 15:34:12-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. JOSÉ LAVRES JUNIOR (Participação Virtual)  
Laboratório de Isótopos Estáveis / Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP

Prof. Dr. PEDRO LUÍS DA COSTA AGUIAR ALVES (Participação Virtual)  
Departamento de Biologia / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente  
**PEDRO LUIS DA COSTA AGUIAR ALVES**  
Data: 31/05/2023 10:57:02-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Jaboticabal, 31 de maio de 2023

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

MARCIO SOUZA DA SILVA, nascido no município de Sud Mennucci - SP em 24 de março de 1994 é engenheiro agrônomo formado pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP/FEIS (2017). Durante a graduação foi bolsista de iniciação científica por 36 meses pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) onde realizou pesquisas acerca da morfofisiologia da soja resistente ao glifosato em resposta à exposição ao herbicida e seus impactos no metabolismo primário. No período de graduação também atuou como monitor de duas disciplinas de Fisiologia vegetal I e Fisiologia Vegetal II para os cursos de Engenharia Agrônômica e Ciências Biológicas na UNESP/FEIS. Realizou estágio obrigatório junto à empresa Geoclen para prospecção de agentes de biocontrole para o manejo da doença da murcha e seca dos ponteiros em eucalipto. Logo em seguida, ingressou no curso de mestrado em Fitotecnia pela Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP onde foi bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior por 8 meses e depois por 14 meses pela FAPESP. Durante o mestrado, realizou estudos sobre a partição de carbono e nitrogênio em café arábica em resposta à carga pendente de frutos, com foco em bioquímica e metabolômica, concluindo o mestrado no ano de 2019. Concomitantemente, realizou MBA em agronegócios pela ESALQ/USP onde estudou sobre análise econômica e viabilidade do cultivo de mandioca pela agricultura familiar (2019). Em 2019, ingressou no programa de pós-graduação em agronomia (Produção vegetal) pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. No doutorado, realiza pesquisas para caracterizar os efeitos benéficos do selênio em cana-de-açúcar, com foco em metabolismo primário e antioxidante. Possui expertise em fisiologia da produção de grandes culturas. Atualmente, é engenheiro agrônomo responsável pelo planejamento e desenvolvimento agrícola da usina Vale do Paraná - Álcool e Açúcar S/A.

## EPÍGRAFE

"Em seu coração o homem planeja o seu caminho, mas o Senhor determina os seus passos". Provérbios 16:9

## DEDICATÓRIA

Ao meu pai Domingos P. Souza, por me ensinar a cada dia o significado das palavras humildade, respeito, caráter e perseverança.

À minha mãe Anita S. C. Souza, pelo seu amor incondicional, pela sua dedicação com a nossa educação e incentivo intensamente dispensados.

Vocês sempre acreditaram no meu potencial, estiveram sempre presentes me apoiando, incentivando nos momentos difíceis, de desespero, mas também nos momentos de alegrias, de vitórias e de conquistas. Somente nós sabemos o quão dura foi a batalha, mas hoje lhes ofereço mais essa conquista.

## AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida e por ter me ofertado resiliência nos momentos difíceis, como diz na Bíblia Sagrada: “Nossa esperança está no Senhor; ele é o nosso auxílio e a nossa proteção” (Salmos 33:20).

Aos meus pais, Domingos P. Souza e Anita S. C. Souza; meus irmãos, Marcelo P. Souza, Maurício S. Silva e Marcos Tiago S. Silva, e toda minha família por terem contribuído com a minha educação e formação, além do grande apoio, carinho, esforço e incentivo sempre demonstrados.

À minha amada esposa Ana Gabriela A. Campos pelo amor, companheirismo, carinho, paciência e apoio presenteados.

Ao meu “irmão” Gustavo R. F. Oliveira (Matias) pela amizade, união fraterna e auxílio mútuo.

Aos meus primos queridos Andreia C. Cavalcanti e Arnaldo Silva pelo apoio, suporte e incentivo presenteados.

À Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP/FCAV pela oportunidade concedida para a realização do curso.

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

Ao Prof. Dr. André Rodrigues dos Reis por me orientar, desafiar e incentivar durante essa etapa da minha formação acadêmica. Agradeço pela confiança no meu trabalho e pelos inúmeros ensinamentos transmitidos.

Ao Grupo de Estudos em Fisiologia Agrícola da UNESP – Campus de Tupã pelo apoio concedido. Agradeço especialmente à Amanda Pereira Paixão, Luan Dionnes Kaiber Moreira, Mateus Vendramini Rampazzo, Matheus Luis Oliveira Cunha, Lara Caroline Alves de Oliveira, Maria Gabriela Dantas Bereta Lanza, Vinicius Martins Silva e Pedro Henrique Gorni pela cooperação durante a realização das análises bioquímicas.

À Usina Vale do Paraná – Álcool e Açúcar S/A pelo suporte para a realização dos experimentos e análises tecnológicas.

À todas as pessoas que de alguma forma colaboraram com a execução deste trabalho e que de forma injusta não foram citadas aqui.

## SUMÁRIO

	<b>Páginas</b>
RESUMO.....	ii
ABSTRACT .....	iii
CAPÍTULO 1 – Considerações gerais.....	1
1. Introdução .....	1
2. Revisão de literatura .....	4
2.1 Selênio no sistema solo-planta-atmosfera.....	4
2.2 Selênio aliviando estresses climáticos em culturas agrícolas .....	7
2.2.1 Modo de ação do selênio no alívio do estresse por seca e calor .....	9
2.2.2 Modo de ação do selênio no alívio do estresse por luminosidade .....	11
2.2.3 Modo de ação do selênio no alívio do estresse por salinidade .....	13
2.3 Selênio mitigando impactos ambientais e poluentes .....	15
2.3.1 Selênio mitiga impactos negativos de herbicidas no ambiente .....	15
2.3.2 Selênio mitiga impactos negativos dos metais pesados no ambiente .....	17
2.4 Biofortificação com selênio em culturas e efeito na qualidade dos alimentos.....	18
2.4.1 Estratégias de manejo agrônômico para biofortificação com selênio .....	19
2.4.2 Biodisponibilidade de selênio em plantas biofortificadas e bioativos.....	21
2.5 Conclusões e perspectivas futuras.....	24
2.6 REFERÊNCIAS .....	25
CAPÍTULO 2 - Efeitos benéficos e fitotóxicos do selênio na cana-de-açúcar: Caracterização dos sintomas, ajustes metabólicos e interações na nutrição da planta .....	46
CAPÍTULO 3 - Resposta fisiológica do selênio na fotossíntese, crescimento vegetal, qualidade tecnológica e produtividade da cana-de-açúcar .....	82
CAPÍTULO 4 - Selênio alivia estresse hídrico na cana-de-açúcar: melhoria da produtividade da cultura e qualidade tecnológica da matéria-prima.....	118

## PAPEL BENÉFICO DO SELÊNIO EM CANA-DE-AÇÚCAR: EFEITOS FISIOLÓGICOS, BIOQUÍMICOS E PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA

**RESUMO** - O selênio (Se) é um elemento benéfico para as plantas, porém as respostas fisiológicas da cana-de-açúcar com uso do Se ainda são escassas. Além disso, não está documentado qual é a fonte e dose recomendada de Se, bem como os níveis críticos de fitotoxicidade. Este estudo tem como objetivo caracterizar o efeito benéfico e fitotóxico do Se em resposta à aplicação foliar de Se utilizando cinco concentrações de Se (0, 20, 40, 80, 160 g ha<sup>-1</sup>) e duas fontes de Se (selenato e selenito de sódio). Adicionalmente, objetiva-se validar a melhor época de aplicação (pré-seca e pré-maturação) da dose benéfica de selenato e selenito de sódio em cana-de-açúcar de sequeiro e irrigado em condições de campo. De modo geral, tanto os sintomas benéficos quanto os sintomas fitotóxicos foram observados em doses menores utilizando o tratamento com selenito comparado ao tratamento com selenato, devido aos efeitos combinados de rapidez na assimilação de selenito em formas orgânicas e também em razão da maior porcentagem do íon acompanhante (sódio) na fonte selenito. A dose benéfica de selenato é de 40 g ha<sup>-1</sup> e do selenito de 20 g ha<sup>-1</sup>. O efeito benéfico do Se está relacionado ao aumento da massa de raiz, número, massa de perfilhos, taxa fotossintética, concentração de CO<sub>2</sub>, eficiência da carboxilação e do uso da água. Além disso, o Se-benéfico melhorou a qualidade tecnológica com aumento da concentração de sacarose, pol e °Brix do caldo obtido. A dose fitotóxica de selenato é de 80 g ha<sup>-1</sup> e do selenito de 40 g ha<sup>-1</sup>. A fitotoxicidade do Se foi caracterizada com redução do crescimento da raiz e parte aérea da cana-de-açúcar aliado a perdas na qualidade tecnológica do caldo obtido. Além disso, a Se-fitotoxicidade promoveu acúmulo de osmólitos via homeostase do metabolismo de carboidratos e degradação de proteínas visando minimizar o estresse oxidativo (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e MDA). Além disso, a fitotoxidez desencadeou na cana-de-açúcar o acúmulo de Ca, Mg, Zn, Fe, Mn e S como estratégia nutricional para acionar mecanismos enzimáticos e não enzimáticos para mitigar o estresse ocasionado pelo excesso de Se. Em condições de campo, foi possível observar que a aplicação foliar de selenito de sódio na época vegetativa mitiga o estresse hídrico em cana-de-açúcar através do estímulo da biossíntese de pigmentos fotossintetizantes e pigmentos de fotoproteção que resultou no maior acúmulo de sacarose na folha e no colmo. Na época de maturação, o melhor tratamento para mitigar o estresse hídrico foi o selenato que atuou como agente antioxidante reduzindo EROs e peroxidação lipídica. Em cana irrigada, a aplicação na época vegetativa de ambas as fontes de Se são eficazes para aumentar o potencial produtivo da cultura através do aumento do número e diâmetro de perfilhos, massa fresca da parte aérea, produtividade de perfilhos e rendimento de açúcar. Na época de maturação, apenas o selenato teve resposta positiva na cana irrigada, aumentando a concentração de clorofilas e feofitina na folha. Conclui-se que a produtividade de açúcar por hectare da cana de sequeiro foi melhorada com uso de selenato e selenito aplicado na época de maturação. Para cana irrigada, ambas as épocas de aplicação utilizando o selenato ou selenito foram eficazes para aumentar a produtividade de açúcar.

**Palavras-chave:** Estresses abióticos, Setor sucroenergético, Sacarose, Metabolismo antioxidante, Nutrição de plantas

## **BENEFICIAL ROLE OF SELENIUM IN SUGARCANE: PHYSIOLOGICAL, BIOCHEMICAL EFFECTS AND AGRICULTURAL PRODUCTIVITY**

**ABSTRACT** - Selenium (Se) is a beneficial element for plants, but the physiological responses of sugarcane with the use of Se are still scarce. Furthermore, it is not documented what is the source and recommended dose of Se, as well as the critical levels of phytotoxicity. This study aims to characterize the beneficial and phytotoxic effect of Se in response to Se foliar application using five Se concentrations (0, 20, 40, 80, 160 g ha<sup>-1</sup>) and two Se sources (Selenate and selenite of sodium). Additionally, the objective is to validate the best season of application (vegetative stage and pre-maturation) of the beneficial dose of sodium selenate and selenite in sugarcane under rainfed and irrigated field conditions. In general, both beneficial and phytotoxic symptoms were observed at lower doses using selenite treatment compared to selenate treatment, due to the combined effects of faster assimilation of selenite into organic forms and also due to the higher percentage of the ion sodium in the selenite source. The beneficial dose of selenate is 40 g ha<sup>-1</sup> and of selenite 20 g ha<sup>-1</sup>. The beneficial effect of Se is related to the increase in root mass, number, tiller mass, photosynthetic rate, CO<sub>2</sub> concentration, carboxylation efficiency and water use. In addition, Se-beneficial improved the technological quality with an increase in the concentration of sucrose, pol and °Brix of the obtained broth. The phytotoxic dose of selenate is 80 g ha<sup>-1</sup> and of selenite 40 g ha<sup>-1</sup>. The phytotoxicity of Se was characterized by reduced root and shoot growth of sugarcane combined with losses in the technological quality of the juice obtained. In addition, Se-phytotoxicity promoted osmolyte accumulation via homeostasis of carbohydrate metabolism and protein degradation in order to minimize oxidative stress (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and MDA). In addition, phytotoxicity triggered the accumulation of Ca, Mg, Zn, Fe, Mn and S in sugarcane as a nutritional strategy to trigger enzymatic and non-enzymatic mechanisms to mitigate the stress caused by excess Se. Under field conditions, it was possible to observe that the foliar application of sodium selenite in the growing season mitigates water stress in sugarcane by stimulating the biosynthesis of photosynthetic pigments and photoprotection pigments, which resulted in greater accumulation of sucrose in the leaf. and in the culm. At the time of maturation, the best treatment to mitigate water stress was selenate, which acted as an antioxidant agent reducing ROS and lipid peroxidation. In irrigated sugarcane, the application in the growing season of both sources of Se are effective in increasing the productive potential of the crop by increasing the number and diameter of tillers, fresh mass of the aerial part, productivity of tillers and sugar yield. At the time of maturation, only selenate had a positive response in irrigated sugarcane, increasing the concentration of chlorophylls and pheophytin in the leaf. It is concluded that the sugar productivity per hectare of dry cane was improved with the use of selenate and selenite applied at the time of maturation. For irrigated cane, both application times using selenate or selenite were effective in increasing sugar productivity.

**Keywords:** Abiotic stresses, Sugar-energy sector, Sucrose, Antioxidant metabolism, Plant nutrition

## **CAPÍTULO 1 – Considerações gerais**

### **1 INTRODUÇÃO**

A agricultura contemporânea enfrenta grandes desafios para a produtividade agrícola que é fortemente afetada por vários estresses bióticos e abióticos, que reduzem severamente o rendimento e a qualidade das culturas para uma população global crescente (Ortiz-Bobea et al., 2021). Além disso, a cobrança social e ambiental por práticas agrícolas que melhorem a qualidade nutricional dos alimentos e minimizem os impactos ambientais são os principais alvos da agricultura sustentável (Dhaliwal et al., 2022).

As mudanças climáticas tem aumentado a incidência e a gravidade de diversos estresses abióticos como a seca, calor, luminosidade e geadas que reduzem consideravelmente a colheita das principais espécies de plantas cultivadas, como por exemplo, o arroz, trigo, milho, soja, café e cana-de-açúcar (Rivero et al., 2022). Em muitas partes do mundo, a precipitação tornou-se menos previsível com fenômenos mais intensos e com maior periodicidade de seca. Adicionalmente, o aumento da temperatura tem sido frequente nas lavouras ocasionando problemas de veranicos devido a maior evapotranspiração com períodos longos de déficit hídrico (Cui et al., 2022).

Em algumas partes do globo onde se encontra regiões áridas e semiáridas a presença de solos salinos é um grande causador de queda na produtividade das culturas na ordem de 17% (Cheng et al., 2021). Além disso, atividades antrópicas podem contaminar solos e rios com metais pesados, os quais inviabiliza a atividade agropecuária e também causa diversos desequilíbrios ambientais (Santorufu et al., 2021).

Outro grande desafio da agricultura é a produção de alimentos de qualidade visando fornecer pelos alimentos as quantidades dietéticas necessárias para a saúde humana como uma estratégia de segurança alimentar e saúde pública (Dhaliwal et al., 2022). Todavia, ao longo dos anos os programas de melhoramento das plantas cultivadas destinaram grandes esforços para aumento da produtividade agrícola,

esquecendo-se da qualidade dos alimentos que são fornecidos para alimentação humana e animal (Stangoulis e Knez, 2022).

Nesse contexto, o uso de Se tem recebido grande atenção na agricultura para aumentar a produtividade agrícola (Mateus et al., 2021; Shalaby et al., 2021), mitigar os efeitos das mudanças climáticas globais (Aqib et al., 2021; Liu et al., 2021; Saleem et al., 2021) e combater a fome oculta de Se por meio da biofortificação de alimentos comestíveis (Lončarić et al., 2021; Luo et al., 2021; Sabatino et al., 2021; Silva et al., 2021).

Quando usado em baixas concentrações em plantas cultivadas, o Se é considerado um elemento benéfico com efeitos pronunciados na mitigação de estresses como salinidade (Desoky et al., 2021), seca (Z. Ahmad et al., 2021), flutuações de temperatura (Sousa et al., 2022), metais pesados (Alves et al., 2020), herbicidas (Afzal et al., 2022) e outros poluentes ambientais. O efeito antiestresse do selênio está relacionado principalmente à ação das selenoproteínas para estimular a via da glutatona peroxidase, que também aumenta os compostos enzimáticos (superóxido dismutase, catalase e ascorbato peroxidase) e não enzimáticos (ácido ascórbico, flavonoides e tocoferóis) que permitem à planta desintoxicar espécies reativas de oxigênio (EROs) (Lanza e Reis, 2021).

O Se tem sido amplamente utilizado para mitigar o estresse hídrico em arroz (Patnaik et al., 2023), trigo (Sardari et al., 2022; Yadav et al., 2023), tomate (Saleem e Fariduddin, 2022) e batata (Perfileva et al., 2022) com efeitos pronunciados na redução de EROs, e aumento da produtividade e qualidade agrícola.

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é um dos principais recursos renováveis para a produção de biocombustíveis, respondendo por 40% do bioetanol, além de contribuir com 80% da produção mundial de açúcar e eletricidade limpa (Rabelo et al., 2019). O setor sucroenergético enfrenta grandes desafios devido às mudanças climáticas globais, que aumentam a incidência e a gravidade de vários estresses abióticos, principalmente a seca que reduz significativamente o rendimento das safras. Em muitas partes do mundo, a precipitação está se tornando menos previsível e com estações secas mais frequentes (Cui et al., 2022). Porém, existem poucos trabalhos na literatura sobre os efeitos benéficos do Se em cana-de-açúcar.

Diante disso, surge a hipótese que o Se tem efeito benéfico em cana-de-açúcar em função do seu papel benéfico no metabolismo antioxidante, fotorregulação e fotossíntese, podendo melhorar a performance agrícola e mitigar o estresse ocasionado pela seca através de mecanismos fisiológicos enzimáticos e não enzimáticos de modo a incrementar a produtividade e qualidade agrícola. Este trabalho teve como objetivo geral avaliar as doses de selenato e selenito de sódio via aplicação foliar para caracterizar os efeitos benéficos e fitotóxicos do Se no metabolismo, crescimento, produtividade e qualidade tecnológica. Além disso, objetivou-se avaliar os efeitos da dose benéfica de Se na mitigação do estresse hídrico em cana-de-açúcar em condições de campo.

Os objetivos específicos, são: (i) caracterizar as respostas benéficas e fitotóxicas associadas à fonte e à dose aplicada de selênio sobre os sintomas visuais, ajustes metabólicos e interações com nutrientes (ii) caracterizar as respostas benéficas e fitotóxicas associadas à fonte e à dose aplicada de selênio sobre a fotossíntese, produtividade e qualidade tecnológica; (iii) e avaliar a melhor época de aplicação de selenato e selenito de sódio visando mitigar o estresse hídrico em cana-de-açúcar.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Selênio no sistema solo-planta-atmosfera

O Se é um elemento calcogênico com propriedades químicas semelhantes ao enxofre (S). O comportamento biogeoquímico do Se no sistema solo-planta-atmosfera é a base do ciclo do Se, pois o Se disponível no solo é absorvido e depois translocado para partes comestíveis das plantas onde será utilizado para alimentação animal e humana, voltando ao solo (Chao et al., 2022). Outra etapa do ciclo do Se é pela conversão do Se-aminoácidos presentes nas plantas em metabólitos voláteis como o dimetil seleneto (DMSe) e dimetil disseleneto (DMDS<sub>2</sub>), principalmente (Kushwaha et al., 2022). Adicionalmente, as atividades antrópicas são uma das principais fontes de disponibilidade de Se na atmosfera em função da queima de combustíveis fósseis e incêndios florestais que liberam o Se para o sistema (Petrović, 2021). Tais Se-voláteis ao entrarem na atmosfera podem retornar às espécies vegetais através da superfície foliar (Pisarek et al., 2021).

Nos solos, a distribuição de Se ao redor do mundo é variável, com solos pobres em Se variando entre 0,01–0,2 mg kg<sup>-1</sup> ou solos seleníferos variando entre 3–100 mg kg<sup>-1</sup> (Chauhan et al., 2019; Yang et al., 2019). A especiação do Se no solo é basicamente controlada pelos eventos de oxidação, redução, mineralização, imobilização e volatilização (Yang et al., 2022). Na solução do solo, as principais espécies inorgânicas de Se são o selenito e o selenato. O selenato tende a ser a forma dominante em ambientes aeróbicos, neutros a alcalinos, enquanto o selenito se torna a forma dominante com potencial redox moderado, especialmente em solos com pH baixo (Yang et al., 2021).

Tanto o selenato quanto o selenito são extremamente solúveis em água, mas o selenito pode ser fortemente adsorvido por fases sólidas do solo, como óxidos de ferro e alumínio, resultando em uma menor solubilidade do selenito na solução do solo do que o selenato (Jones et al., 2017). A matéria orgânica também é uma parte importante da adsorção do selenito no solo. Por outro lado, o selenato é fracamente adsorvido na superfície dos componentes do solo (Li et al., 2017).

Normalmente, as plantas absorvem Se da solução do solo preferencialmente na forma de selenato em detrimento da absorção na forma de selenito (Hossain et al., 2021). Os selenoaminoácidos também estão presentes em alguns solos e podem ser absorvidos pelas raízes das plantas, mas geralmente as formas inorgânicas são as mais abundantes para absorção radicular (White, 2018). As células radiculares possuem transportadores de sulfato de alta afinidade (HASTs) homólogos aos transportadores de *Arabidopsis thaliana*, AtSULTR1;1 e AtSULTR1;2, através dos quais o selenato pode entrar nas células radiculares devido a sua semelhança química com o enxofre (White, 2018). Por outro lado, o selenito entra nas plantas através de transportadores de fosfato quando na forma de  $\text{HSeO}_3^-$  e também por aquaporinas (OsNIP2) quando na forma de  $\text{H}_2\text{SeO}_3$  (White, 2018). Estudos demonstram que existe efeito antagônico do sulfato com selenato e fosfato com selenito devido competição pelos mesmos sítios dos transportadores envolvidos (Li et al., 2022; Wang e Song, 2021; H. Zhang et al., 2022).

Após a absorção de Se pelas células da raiz, o selenato se move rapidamente através do simplasto da raiz onde é transportado via xilema para a parte aérea, enquanto o selenito é convertido rapidamente em formas orgânicos, como o selenometionina (SeMet) e selenocisteína (SeCys) na própria raiz (Di et al., 2023). Por outro lado, as formas orgânicas presentes na solução do solo que são absorvidas como a SeMet e SeCys são captadas por transportadores de metionina e cisteína (White, 2018).

Estudos demonstram que os transportadores de malato ativados por alumínio (ALMT) carreguem selenato na seiva do xilema (Malcheska et al., 2017; White, 2018), mas também esse transporte ocorre nas células do periciclo e do parênquima do xilema pelos homólogos do AtSULTR2;1 e AtSULTR3;5 (H. Zhang et al., 2022). Em diversos trabalhos pesquisadores têm observado que a expressão de SULTR2; 1 é induzida pela falta de S ou acúmulo de Se, provavelmente devido efeito antagônico de competição pelo mesmo sítio do transportador (El Mehdawi et al., 2018; Trippe e Pilon-Smits, 2021; Zhang et al., 2020).

O processo de redução assimilatória do Se inorgânico a selenoaminoácidos envolve uma sequência de etapas realizadas por enzimas relacionadas ao metabolismo de enxofre (White, 2018). O selenato é reduzido a selenito pela ação de

duas enzimas, a ATP sulfurilase (APS) e adenosina fosfosulfato redutase (APR). Posteriormente, através da reação feita pelas enzimas sulfito redutase e glutatona/glutaredoxinas o selenito é convertido a seleneto. O seleneto finalmente é então convertido a SeCys pelo acoplamento com O-acetilserina mediada pela ação da enzima cisteína sintase. No final da etapa de assimilação é formado a SeCys e, posteriormente, forma-se SeMet, os quais são os dois Se-aminoácidos que formam selenoproteínas (Lanza e Reis, 2021).

A translocação de Se nas plantas é muito similar ao enxofre. Após a assimilação de Se nas folhas, o Se é translocado para os drenos metabólicos mediados por relações fonte-dreno, na qual a SeMet e selenometilcisteína (SeMeSeCys) são transportadas para o grão de forma mais eficiente do que o selenito e selenato. SeMet e SeMeSeCys são translocados exclusivamente via floema, enquanto o Se inorgânico é transportado tanto pelo floema quanto pelo xilema (Carey et al., 2012; Marques et al., 2021; Poblaciones et al., 2014; Wu et al., 2015).

As plantas são categorizadas em três grupos dependendo do acúmulo intracelular de Se: não acumuladoras ( $<100 \text{ mg Se kg}^{-1}$ ), acumuladores ( $100\text{--}1000 \text{ mg Se kg}^{-1}$ ) e hiperacumuladores ( $>1000 \text{ mg Se kg}^{-1}$ ) (Pilon-Smits, 2019). No caso de plantas acumuladoras e hiperacumuladores, altas concentrações de Se não são incorporadas às proteínas evitando Se-toxicidade, pois a biossíntese de SeMet é limitada pela conversão do precursor SeCys em aminoácidos não proteicos como Se-metilselenocisteína e gama-glutamil-Se-metilselenocisteína (Irish et al., 2023).

Em plantas não acumuladoras, para evitar Se-toxicidade como mecanismo de sobrevivência, geralmente converte SeMet pela reação de metilação mediada pela enzima S-adenosil-L-metionina:L-metioninaS-metiltransferase formando selenometilmetionina (SeMM). Posteriormente, SeMM é convertida diretamente em DMSe pela enzima metilmetionina hidrolase, ou através da síntese da molécula intermediária 3-dimetilselenoniopropionato. As plantas também podem volatilizar Se como DMSe, porém DMSe parece ser a forma gasosa mais estável (Kushwaha et al., 2022).

O Se volátil também pode ser liberado para atmosfera por fontes naturais - incluindo desgaseificação vulcânica (5% das emissões totais), biota marinha (35%) e biota terrestre (15%) e fontes antropogênicas (40%), sendo esta última derivada de

combustão de carvão, fundição de metais, e incêndios florestais (Feinberg et al., 2020). O Se volátil pode retornar aos vegetais através da superfície foliar onde retorna ao sistema (Chen et al., 2022).

## **2.2. Selênio aliviando estresses climáticos em culturas agrícolas**

As plantas são organismos sésseis que desenvolveram diversos mecanismos de adaptação a nível molecular, bioquímico e morfofisiológico para suportar estresses ambientais de origem biótica e abiótica (Weng et al., 2021). No cenário atual, muito se fala em mudanças climáticas, as quais geram grandes perdas para a agricultura global devido aumento da frequência e intensidade das anomalias de clima, como: a seca, calor e alta radiação (Ortiz-Bobea et al., 2021).

Todos os estresses ambientais mencionados geram aumento anormal de espécies reativas de oxigênio (EROS) que degradam biomoléculas vitais para o crescimento e desenvolvimento normal das plantas, tais como: DNA, RNA, proteínas e lipídeos. Essas EROS são presentes na forma de ânion superóxido ( $O_2^-$ ), peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), radical livre hidroxila ( $OH\cdot$ ), oxigênio singlete ( $^1O_2$ ), radical metil ( $CH_3\cdot$ ) e radicais livres de peroxidação lipídica ( $LOO\cdot$ ,  $ROO\cdot$ ). Nessa condição, estratégias enzimáticas e não enzimáticas são disparadas para detoxificação de EROS na célula vegetal (Sachdev et al., 2021). A primeira estratégia envolve as enzimas antioxidantes, como a superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathione redutase (GR) e ascorbato peroxidase (APX) que são tidas como marcadores úteis para avaliar a luta contra o estresse oxidativo no metabolismo vegetal. A segunda estratégia envolve a ação de moléculas não enzimáticas que são importantes para a preservação do estado redox celular, sendo do tipo: glutathione (GSH-Px), ascorbato, fitoquelatinas, prolina, flavonoides, alcaloides e carotenoides (Irato e Santovito, 2021).

Na Figura 1 mostra os mecanismos fisiológicos do Se no aumento da tolerância das plantas aos estresses ambientais. O Se aplicado em baixas concentrações pode estimular a atividade de enzimas do metabolismo antioxidante, como a SOD, CAT, APX e GR e diminuindo a concentração de  $H_2O_2$  e malondialdeído (MDA) em plantas de feijão caupi (Silva et al., 2020), amendoim (Cunha et al., 2022), café (Mateus et al.,

2021), trigo (Sardari et al., 2022) e arroz (Das et al., 2022). Além disso, o Se está relacionado com acúmulo de ácido ascórbico, que elimina o  $H_2O_2$  por meio de várias reações, incluindo manutenção da redução de  $\alpha$ -tocoferol, biossíntese de zeaxantina, redução do status de íons metálicos e manutenção de enzimas antioxidantes ativas. O tocoferol, comumente referido como vitamina E, funciona eliminando os radicais livres de peróxido de lipídios melhorando função das membranas celulares. Assim, o principal efeito antioxidante da vitamina E é proteger a bicamada fosfolipídica da membrana celular e prevenir a peroxidação lipídica (Lanza e Reis, 2021).



Figura 1 - Mecanismos fisiológicos do Se no aumento da tolerância das plantas aos estresses ambientais. Fonte: Cunha et al. (2022); Sardari et al. (2022); Das et al. (2022); Mateus et al. (2021); Silva et al. (2020).

Adicionalmente, a concentração de compostos fenólicos e flavonoides são estimulados devido ao papel do Se no aumento da atividade da enzima fenilalanina

amônia liase, que é fundamental para a biossíntese de compostos fenólicos e flavonoides nas plantas (Saeedi et al., 2021). Os compostos fenólicos, especialmente os flavonóides, são compostos amplamente reconhecidos como antioxidantes benéficos devido à sua capacidade de eliminar íons de radicais livres e proteger as plantas dos efeitos negativos do estresse ambientais (Dias et al., 2021). Silva et al. (2020) observaram que aplicação foliar com Se em baixa dose induziram a conversão de clorofila a em clorofila b. Segundo os mesmos autores, a rota foi estimulada para regular a atividade fotossintética de feijão caupi em condição de estresse, a qual protege o fotossistema contra o excesso de EROS.

A enzima GSH-Px é considerada uma chave que pode ser fortemente ativada pelo Se em diversas plantas expostas a diferentes estresses ambientais, pois ela está relacionada a regeneração de glutathiona reduzida (GSH) que tem um papel central na detoxificação de EROS e metilglioxal, ambos compostos fitotóxicos (Dorion et al., 2021; Feng et al., 2013). O aumento da atividade enzimática induzida por Se de GSH-Px elimina  $\text{OH}\cdot$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$  de modo a gerar uma diminuição na formação de  $\text{O}\cdot_{2^-}$  e demais EROS (Lanza e Reis, 2021). Em condições de estresse severo pode reduzir os níveis de GSH, e conseqüentemente, da enzima GSH-PX, viabilizando-a via ciclo ascorbato-glutathiona, sendo necessário o uso de enzimas antioxidantes e compostos não enzimáticos para homeostase do metabolismo vegetal (Sharifi et al., 2021).

Nas próximas subseções serão abordadas diferentes estratégias enzimáticas e não enzimáticas de culturas agrícolas para superar condições de estresse ocasionado pela seca, calor e alta radiação através das pesquisas mais recentes no cenário científico.

### **2.2.1 Modo de ação do selênio no alívio do estresse por seca e calor**

Atualmente, eventos de seca prolongada associados a ondas de calor tem impacto negativo sobre a produtividade e o rendimento das colheitas (Arora, 2019). A produção agrícola enfrenta grandes dificuldades relativas ao suprimento de água na quantidade e uniformidade adequadas para manter o potencial produtivo das culturas, enquanto está em condição de alta temperatura onde a evapotranspiração agrava ainda mais o déficit hídrico (Malhi et al., 2021). Em diversos estudos mostraram que

os efeitos combinados da seca e ondas de calor impactam negativamente o rendimento das principais culturas, incluindo a soja (*Glycine max* L.) (Cohen et al., 2021), milho (*Zea mays* L.) (Ayub et al., 2021), cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) (Selvi et al., 2020), trigo (*Triticum aestivum*) (Abdelhakim et al., 2021) e arroz (*Oryza sativa* L.) (Costa et al., 2021), em termos de ingestão de calorias e proteínas, eles são a base do suprimento global de alimentos e rações.

O mecanismo de resposta à seca e calor em plantas inclui processos morfofisiológicos, bioquímicos, celulares e moleculares que ocorrem nas plantas subjacentes ao estresse. O calor e a seca são dois dos estresses mais importantes das mudanças climáticas, com grandes impactos no crescimento e na produtividade das lavouras. As plantas sofrem com a seca quando o suprimento de água para as raízes é limitado ou a perda de água pela transpiração é muito alta. A seca interfere no crescimento, nas relações de nutrientes/água, na fotossíntese, na distribuição de assimilados e, em última análise, leva a uma diminuição significativa na produtividade das culturas (Yin et al., 2022).

O estresse térmico danifica gravemente as proteínas, interrompendo sua síntese, inativando enzimas-chave e prejudicando a atividade fisiológica das membranas celulares, como o intercâmbio de substâncias entre o meio extracelular e o citoplasma, e atividades de proteínas associadas às membranas (Costa et al., 2021). O estresse térmico também tem um efeito negativo importante no processo de divisão celular (Ru et al., 2023). Tais estresses abióticos somados ocasionam déficit hídrico, o qual prejudica a atividade regular da respiração, fotossíntese e movimento estomático das plantas, além de aumento anormal de EROS a nível celular (Cohen et al., 2021).

Neste aspecto, segundo Lanza e Reis (2021) o Se é um importante elemento para mitigar esse estresse abiótico, pois ele atua promovendo a biossíntese de compostos não enzimáticos e enzimáticos para a detoxificação de EROS, estimula a produção de pigmentos acessórios e regula a atividade fotossintética das culturas sob estresse. A aplicação de Se está associada ao estímulo da biossíntese de compostos fenólicos, como os flavonoides que atuam como agentes antioxidantes não enzimáticos para detoxificação de EROS de plantas sob estresse (Saeedi et al., 2021).

Além disso, o Se estimula a biossíntese de tocoferol que protege a membrana plasmática vegetal contra a peroxidação lipídica (Hasanuzzaman et al., 2019).

Estudo desenvolvido por Han et al. (2022) mostraram que tanto o selenato quanto o selenito em baixas doses atenuaram muitos dos efeitos prejudiciais da seca em *Nicotina tabacum*, aumentando a atividade das enzimas antioxidantes para reduzir a peroxidação lipídica induzida pelo estresse e os níveis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. O Se também pode ser utilizado como uma estratégia para recuperação das plantas pós seca, como observado por Ramasamy et al. (2019) que mostraram que o Se aumenta a atividade as enzimas antioxidantes como SOD, CAT, APR e GR com reduções nos níveis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e MDA em tomate.

Segundo Silva et al. (2020) o Se regula a atividade fotossintética pelo estímulo da rota de conversão de clorofila a para clorofila b, protegendo o fotossistema II contra os efeitos nocivos do aumento anormal de EROS. Adicionalmente, os mesmos autores observaram aumentos significativos de carotenoides que atuam como pigmentos fotoprotetores que aumenta a eficiência fotoquímica do complexo antena de plantas sob estresse. Estudando o efeito do Se sobre o amendoim, Cunha et al. (2022) observaram que houve acúmulo de feofitina, sendo este um importante pigmento responsável por dissipar o excesso de energia evitando processos de fotoinibição e fotooxidação da clorofila em plantas sob estresse. Resultados semelhantes foram obtidos por Mateus et al. (2021) que observaram que o Se aumentou a concentração de clorofila a, clorofila b, carotenoides e feofitina em plantas de café.

É certo que a temperatura e disponibilidade hídrica é determinante para culturas agrícolas eficientes e que na limitação desses fatores ambientais o dano na produtividade agrícola é afetado imperativamente. Todavia, o Se tem papel benéfico comprovado em mitigar os efeitos adversos de clima em culturas agrícolas, aumentando a sua tolerância através de mecanismos antioxidantes, modulação da biossíntese de pigmentos fotoprotetores e aumento da fotossíntese em plantas estressadas.

### **2.2.2 Modo de ação do selênio no alívio do estresse por luminosidade**

O impacto cumulativo da vida humana em nosso planeta levou a um grande aumento da produção de gases de efeito estufa provenientes da queima de combustíveis fósseis. Os gases do efeito estufa, de modo geral, danifica a camada de ozônio estratosférico e aumenta os níveis de radiação ultravioleta-B (UV-B) que atingem a superfície da Terra e as plantas (Zandalinas et al., 2021). A UV-B tem uma faixa de comprimento de onda de 280–315 nm. As plantas percebem o UV-B como um sinal ambiental e um potencial estressor abiótico que afeta o desenvolvimento e a adaptação ao ambiente (Shi e Liu, 2021).

A alta intensidade da radiação UV-B de alta intensidade também pode prejudicar as plantas danificando o DNA, desencadeando o acúmulo de EROS e prejudicando a fotossíntese. Outros sintomas ao estresse UV-B são observados em função de respostas mediadas por fotomorfogênese, incluindo a inibição do alongamento do hipocótilo, a expansão do cotilédone e o acúmulo de flavonoides. As plantas sob estresse de UV-B são estimuladas a biossíntese de flavonóides para prevenir ou limitar os danos oxidativos (Shi e Liu, 2021).

Segundo Golob et al. (2018), o tratamento com Se reduz os efeitos nocivos da alta radiação ultravioleta nos parâmetros químicos e de produção do trigo sarraceno híbrido, mostrando que o Se atua nas plantas de trigo sarraceno estabelecendo proteção contra as diferentes esse estresse abiótico que se torna cada vez mais frequentes devido às mudanças no nosso clima. Yao et al. (2013) observaram que a alta radiação UV-B reduziu o rendimento do trigo, a concentração de proteína no grão de trigo, mas o Se foi capaz de minimizar os efeitos adversos da alta radiação UV-B, aumentando o rendimento do trigo, a concentração de proteína e aumentou a concentração de nitrogênio, ferro e cobre no grão de trigo submetido ao estresse UV-B.

Estudo desenvolvido por Golob et al. (2017) mostraram que o Se minimiza os impactos causados pelo estresse UV-B através de mecanismo de estímulo da produção e acúmulo de fitólitos. Os fitólitos são estruturas microscópicas de sílica amorfa que são produzidas dentro e entre as células vegetais de polimerização e acúmulo de sílica que têm papel de estruturação do tecido vegetal e proteção contra herbivoria e alta radiação solar (Liu, 2021). Esses compostos tem função muito relevante para tolerância ao estresse biótico e abiótico, como por exemplo, pragas,

doenças, herbívora, metais pesados, sais e estresse hídrico. Majoritariamente, os fitólitos têm função de barreira mecânica que está associado a melhora da taxa fotossintética. Esse efeito na fotossíntese ocorre porque os fitólitos auxiliam na arquitetura da planta de modo que as folhas fiquem mais eretas e grande área de superfície para absorver mais luz solar, sendo que a sílica depositada aumenta a interceptação da luz solar (Nawaz et al., 2019).

### **2.2.3 Modo de ação do selênio no alívio do estresse por salinidade**

Os impactos das mudanças climáticas não se limitam aos efeitos diretos na agricultura, mas também incluem efeitos secundários que reduzem a produtividade e a qualidade das plantas. Um exemplo disso é o aumento de terras cultivadas salinizadas devido ao aquecimento global que promove o aumento do nível do mar afetando áreas agricultáveis da região costeira dos continentes (Corwin, 2021). Estima-se que 20% das terras aráveis do mundo e 33% das terras irrigadas sejam afetadas pela alta salinidade (Ludwiczak et al., 2021). A área salinizada vem aumentando gradativamente a cada ano e deve chegar a 50% até o final de 2050 (Hassani et al., 2021).

Vários fatores, como excesso de irrigação e má drenagem, salinidade das águas subterrâneas, aumento e intrusão do nível do mar, chuvas irregulares contribuem para o processo de salinização do solo (Eswar et al., 2021). De certo que a salinidade deve ser encarada como um desafio da agricultura contemporânea, e o desenvolvimento de estratégias de melhoramento genético de plantas, manejo agrônomo e gestão racional dos recursos hídricos são a chave para a produção agrícola sustentável (Desoky et al., 2021).

A salinidade reduz o crescimento e o desenvolvimento das culturas devido à pressão osmótica anormal gerada nos vegetais, levando a um desequilíbrio iônico nas células causado por relações  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  desequilibradas e concentrações intracelulares de íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  em níveis tóxicos (Rad et al., 2021; Rehman et al., 2021), além de aumentar exacerbadamente os níveis de EROS, como o  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2^{\cdot-}$ ,  $^1\text{O}_2$ ,  $\text{HO}\cdot$  e várias formas de peróxidos orgânicos e inorgânicos (Mittler et al., 2022). Esses compostos são altamente reativos com biomoléculas, levando a danos oxidativos no nível celular,

aumento da peroxidação lipídica, degradação de proteínas/enzimas, material genético e diminuição da estabilidade da membrana celular (Ghosh et al., 2022).

Assim, a salinidade induz vários distúrbios morfológicos, fisiológicos e bioquímicos nos tecidos vegetais, incluindo regulação negativa de pigmentos fotossintéticos e diminuição da eficiência fotossintética devido à minimização da atividade do fotossistema II, redução da condutância estomática e assimilação de CO<sub>2</sub> que culmina com a decréscimo do crescimento e da produtividade das culturas agrícolas (Semida et al., 2021). Além disso, o aumento da absorção de sal diminui a absorção de nutrientes essenciais como fósforo, potássio, nitrogênio, cálcio e zinco (Iqbal et al., 2018; Razzaq et al., 2020; Shabala e Pottosin, 2014).

No geral, a aplicação exógena de Se pode reduzir o estresse oxidativo aumentando a atividade de eliminação de EROS, aliviando assim o estresse salino (Ashraf et al., 2018; Astaneh et al., 2019; Elkelish et al., 2019; Shalaby et al., 2017). Estudos recentes têm demonstrado experimentalmente um efeito direto do Se na expressão de genes envolvidos na defesa antioxidante (ZmMPK5, ZmMPK7 e ZmCPK11), bem como nos níveis de transcrição de OsNHX1 responsável pelo sequestro de Na<sup>+</sup> no vacúolo (Jiang et al., 2017; Subramanyam et al., 2019). Além disso, o Se aumenta a síntese de osmoprotetores como prolina, glicina betaína e açúcares (Galić et al., 2021; Semida et al., 2021), ativa mecanismos oxidativos enzimáticos e não enzimáticos (Desoky et al., 2021; Rasool et al., 2022), reduz os níveis de MDA e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Sharifi et al., 2021) e regula a relação K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> a nível celular e aumenta a eficiência fotossintética das culturas (Jiang et al., 2017).

Dessa forma, é claro que os mecanismos de tolerância a salinidade induzidos pelo selênio nas plantas envolvem o aumento da capacidade fotossintética e dos sistemas de defesa antioxidante, e regulação iônica e osmótica a nível celular por meio de biossíntese de osmólitos compatíveis e expressão de genes envolvidos no influxo de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> na célula. Esses efeitos benéficos do Se nas culturas agrícolas pode ser a chave para mitigar os impactos causados pela salinidade a curto e médio prazo. Por exemplo, a aplicação de baixas concentrações de Se protegeram a soja (Rahman et al., 2021), milho (Xu et al., 2021), arroz (Badawy et al., 2021), trigo (Rady et al., 2021), tomate (N. M. Ali et al., 2021) do estresse salino, aumentando a

fotossíntese, crescimento, produtividade e qualidade das culturas agrícolas, mesmo em condição de estresse osmótico imposto pela salinidade.

### **2.3 Selênio mitigando impactos ambientais e poluentes**

A agricultura contemporânea tem enfrentado grandes desafios no manejo de plantas daninhas que estão mais agressivas e adaptáveis aos defensivos agrícolas, o que a médio e longo prazo culmina com aumento da dose aplicada e sintomas de fitotoxicidade nas plantas cultivadas (Shahzad et al., 2021). Além disso, o uso de herbicida sem critério tem aumentado os problemas de resistência das plantas daninhas às moléculas e isto faz que a dose aumenta a cada safra e as tecnologias ficam obsoletas em poucos anos de aplicação agrícola (Ghatrehsamani et al., 2023).

A crescente urbanização e industrialização provocou aumento na geração de resíduos sólidos e tornou-se uma preocupação global e o vazamento de lixiviados de aterros sanitários contamina o solo, as águas superficiais e subterrâneas culminando com impacto severo no ambiente e saúde humana (Ahmad et al., 2021). A poluição por metais pesados, principalmente, Cromo (Cr), níquel (Ni), cobre (Cu), zinco (Zn), Arsênio (As), Cádmio (Cd), Bário (Ba), Mercúrio (Hg) e Chumbo (Pb) são ameaças notáveis ao ambiente. Além disso, a poluição do solo por metais pesados pode causar risco ecológico potencial e a poluição por metais pesados das culturas pode causar risco à saúde humana por meio da ingestão de partes comestíveis contaminadas (Xiang et al., 2021).

Nas próximas subseções serão abordadas diferentes estratégias do Se para mitigar o impacto ambiental de herbicidas e metais pesados no ambiente, produção agrícola e alimentação humana através das pesquisas mais recentes no cenário científico.

#### **2.3.1 Selênio mitiga impactos negativos de herbicidas no ambiente**

Dentre os herbicidas utilizados na agricultura, encontra-se o Paraquat (1,1'-dimethyl-4,4'-bipyridinium - PQ) é um herbicida de contato não-seletivo, um sal de amônio bi-quaternário que atua na presença da luz inibindo o fotossistema das

plantas, gerando aumento anormal de radicais livres que ataca os ácidos graxos insaturados das membranas, rapidamente abrindo e desidratando as membranas e tecidos das células. A aplicação do PQ nas lavouras é transportada pela força da chuva a jusante, chegando aos corpos d'água e se tem relatado fitotoxicidade de espécies de algas (Bai et al., 2023; Naaz et al., 2021). Recentemente, Afzal et al. (2022) mostraram que o Se é capaz de mitigar os efeitos nocivos do PQ em cianobactérias através do estímulo do metabolismo antioxidante, aumentando a atividade das enzimas antioxidantes SOD (7,55%), CAT (57,94%), APX (17,45%) e GR (14,72%). Chandra e Roychoudhury (2020), mencionam que a atividade antioxidante de tratamento com Se ocorre através da biossíntese de selenoproteínas para eliminação de radicais livres que protegem contra o estresse oxidativo e apoiam o sistema de defesa das plantas.

A atrazina, herbicida amplamente utilizado em diversas culturas, é considerada um dos poluentes da água com grandes riscos biológicos aprovados para plantas, animais e humanos. Zedan e Omar (2019) observaram que as nanopartículas de selênio (NP-Se), tem atividade de eliminação de EROS, reduzindo a genotoxicidade da atrazina. NP-Se, em causou redução os efeitos nocivos de Atrazina e melhorando o desempenho das mudas, como maior germinação, crescimento da parte aérea e raiz.

Outro herbicida amplamente utilizado na produção de arroz é a fenoxaprop-p-etil, um herbicida seletivo de pós-emergência com atividade sistêmica e de contato. É absorvido pelas folhas e levado pela seiva, acumulando-se principalmente nos meristemas. Inibe a síntese de acetil-CoA carboxilase, que sucumbe à formação de ácidos graxos que compõem as membranas celulares, impedindo o desenvolvimento de células em meristemas. No trigo, observou-se que o Se tratado pelas sementes antes da exposição ao estresse herbicida foi eficaz em reduzir os efeitos negativos do fenoxaprop-p-etil sobre o sistema antioxidante, peroxidação lipídica, pigmentos fotossintéticos e fenólicos totais (Akbulut et al., 2018).

À luz do exposto, fica claro que o Se tem papel na mitigação do estresse e de poluentes em corpos d'água em função da fitotoxicação por herbicidas. Esse mecanismo está relacionado ao estímulo do metabolismo antioxidante, produção de compostos não enzimáticos que detoxificam as plantas e o ambiente desse agente

poluente ambiental. Todavia, estudos adicionais precisam ser desenvolvidos para elucidar a eficiência do uso do Se e sua aplicabilidade para mitigar problemas de fitotoxicidade e poluentes ambientais em função do uso inadequado de herbicidas.

### **2.3.2 Selênio mitiga impactos negativos dos metais pesados no ambiente**

A contaminação de solos agrícolas por metais pesados tornou-se uma preocupação mundial, pois afeta diretamente a saúde humana e ameaça à segurança alimentar. Atividades humanas como mineração, fundição de metais, deposição atmosférica, irrigação com água contaminada e uso de fertilizantes ou agroquímicos contendo metais podem aumentar a concentração de metais tóxicos no solo (Zhao et al., 2022). O processo de absorção de metais pelas raízes das plantas é um processo sem seletividade específica, e o risco de absorção de elementos nocivos é atribuído às plantas para promover o metabolismo vegetal. Por fim, esses elementos podem ser entregues nas partes comestíveis das plantas, contaminando humanos e animais através dos alimentos (Zakaria et al., 2021).

Muitas culturas podem acumular quantidades substanciais de metais pesados, e sua bioampliação através da cadeia alimentar representa uma ameaça à saúde humana. A ingestão de alimentos contaminados provoca problemas na saúde humana, como alterações renais, lesões cerebrais e existe a suspeita de que também possam aumentar o risco de câncer. Muitos estudos estão sendo desenvolvidos para utilizar aplicação de Se nas plantas cultivadas para limitar a absorção e acúmulo de metais nas partes comestíveis das plantas (Ali et al., 2021; Feng et al., 2021a; Ismael et al., 2018; Rizwan et al., 2021).

Muitos metais pesados concorrem diretamente com o Se pelos mesmos sítios de transportadores de membrana, o que resulta na limitação da absorção de Cr, Hg, Pb, Cd em área tratada com Se. Outro mecanismo do Se para mitigação toxicidade por metais pesados está relacionado ao papel do elemento no estímulo do metabolismo antioxidante pelas enzimas superóxido dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX), glutathiona peroxidase (GSH-Px), guaiacol peroxidase (GPOX) e glutathiona redutase (GR). Além disso, o Se estimula a biossíntese de compostos não enzimáticos, como glutathiona reduzida, ascorbato e

tocoferol que aumenta a tolerância das plantas à presença de metais pesados (Feng et al., 2021b).

Nos últimos anos, um número crescente de pesquisas provou que o Se pode aumentar a tolerância das plantas ao estresse pelos metais pesados. Em pepino (*Cucumis sativus* L.) foi observado que o Se aliviou sintomas de estresse por Cd e Pb (Shekari et al., 2019). Além de aumentar a tolerância da planta ao metal pesado, Liu et al. (2022) observaram que a aplicação de fertilizantes a base de Se reduziram significativamente o acúmulo de Cd, Pb e As no arroz. Adicionalmente, os mesmos autores também observaram ganhos na biodisponibilidade de Se na forma de selenometionina e selenocisteína. A redução do acúmulo de As e Pb no grão de trigo pelo tratamento com Se também está relacionado a maior produtividade e qualidade do grão (Gu et al., 2022) e Qutab et al. (2017) observaram redução no acúmulo de Cd no grão de milho tratado com Se de modo a reduzir a potencialidade de toxicidade no alimento produzido.

Em geral, o selênio pode melhorar o sistema antioxidante das plantas, ajudar a reparar a estrutura e função celular danificada da planta e promover a formação de complexos com metais pesados, afetando assim a absorção e o transporte das plantas. O exposto acima confirma o importante papel do selênio no alívio do estresse e na redução da produção de alimentos tóxicos.

#### **2.4 Biofortificação com selênio em culturas agrícolas e efeito na qualidade dos alimentos**

O Se é um oligoelemento essencial para animais e humanos (Ferreira et al., 2021). A baixa ingestão de Se na dieta tem sido associada a problemas de saúde, incluindo eventos epiléticos, hipotireoidismo fetal congênito, disfunção do sistema cardiovascular, diminuição da fertilidade e deficiências cognitivas e imunológicas (Newman et al., 2019). Além disso, a deficiência de Se a longo prazo em humanos tem sido associada à doença de Alzheimer, depressão e transtornos de ansiedade. O Se pode aumentar a taxa de sobrevivência de pacientes com HIV porque o Se pode retardar a progressão da AIDS. O Se também é necessário para o desenvolvimento

fetal normal em mulheres e animais. Além disso, a deficiência de Se causa envelhecimento precoce em humanos (Schiavon et al., 2020).

Normalmente, os humanos absorvem o Se através do consumo de plantas e produtos de origem animal. Os valores permitidos variam de 40 a 75  $\mu\text{g}$  pessoa<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> (Brigelius-Flohé, 2018). No entanto, o consumo de Se está abaixo da faixa recomendada na maior parte do mundo. É sabido que a concentração de Se nos alimentos depende da quantidade de Se disponível no solo e da capacidade das plantas de absorver e acumular esse elemento (Hossain et al., 2021). Sabe-se que a maioria dos solos do mundo são pobres em Se. Além disso, durante anos, os programas de melhoramento vegetal se concentraram em melhorar a produtividade agrícola, esquecendo-se da qualidade dos alimentos (Stangoulis e Knez, 2022).

A Se-biofortificação é uma prática de manejo que visa aumentar a concentração de Se nas partes comestíveis das plantas. Dessa forma, a biofortificação agrônômica tem sido um dos pilares da segurança alimentar para fornecer alimentos com qualidade nutricional para uma população crescente (Dinh et al., 2019). Essa prática tem muitas vantagens sobre a suplementação direta de Se, pois o Se inorgânico absorvido pela planta é transformado em uma forma orgânica, que tem maior biodisponibilidade para seres humanos e animais (Garza-García et al., 2022).

Diferentes manejos agrônômicos afetam a eficiência da biofortificação com Se em cultivos agrícolas, como: adubação via solo e aplicação foliar, e também uso de fertilizantes orgânicos, inorgânicos e nanofertilizantes, além da época de aplicação de Se. Nas próximas subseções serão abordadas diferentes estratégias de fornecimento de Se para biofortificação agrônômica e seu efeito no acúmulo de Se e de compostos bioativos nas partes comestíveis das plantas através das pesquisas mais recentes no cenário científico.

#### **2.4.1 Estratégias de manejo agrônômico para biofortificação com selênio**

Ros et al. (2016) utilizando meta-análise com mais de 240 experimentos, descreveram que os fatores mais importantes que controlam a resposta das culturas aos fertilizantes de Se são a Se-fonte, Se-dose, modo de aplicação e época de aplicação. Nesse estudo, foi observado que a adubação orgânica com Se é ineficiente,

enquanto que Se-inorgânico como o selenato e selenito tem maior absorção pela planta. Todavia, a melhor Se-fonte observada no estudo foi o selenato que resultou em 33x mais eficiência do que o selenito. A adubação orgânica com Se é ineficiente porque a matéria orgânica retém grande parte do Se, o que reduz drasticamente a sua biodisponibilidade no solo. Além disso, o selenito é mais adsorvido à matéria orgânica do que o selenato (Li et al., 2017).

Recentemente, pesquisadores estão obtendo excelentes resultados com as nanopartículas de selênio (SeNPs) devido à sua alta biodisponibilidade e menor toxicidade do que as formas inorgânicas e orgânicas de Se (Garza-García et al., 2022). Em alguns trabalhos com tabaco, cebola, espinafre e arroz foi demonstrado que os SeNPs tem velocidade de absorção maior do que o selenito, porém menor do que o selenato, mas a fertilização com SeNPs parece resultar em alimentos com maior biodisponibilidade de Se do as outras fontes inorgânicas de Se (Golubkina et al., 2017; Li et al., 2020; Wang et al., 2020). Embora sejam resultados animadores, o uso de SeNPs para biofortificação carece de mais estudos, pois o tamanho das nanopartículas, o método de síntese e a composição da superfície podem alterar a absorção e metabolização dos alimentos vegetais biofortificados com SeNPs em humanos, comparando-se à outras fontes de Se convencionalmente utilizadas (Garza-García et al., 2022).

Ros et al. (2016) observaram que a dose de 40 g ha<sup>-1</sup> resultou na melhor eficiência da adubação com Se. Recentemente, Lanza e Reis et al. (2021) relataram em diferentes culturas e modos de aplicação de Se que para fornecer a quantidade dietética recomendada, deve-se aplicar em plantas medicinais e legumes a dose de 50 g ha<sup>-1</sup>, enquanto que em cereais a dose cai para 25 g ha<sup>-1</sup>. Frutas cultivadas em solução nutritiva a dose ideal é de 10 µM e em cultivos de vegetais aplicação no solo a dose é de 0.75 mg kg<sup>-1</sup>. De modo geral, a absorção de Se é mais efetiva quando se usa doses baixas (Desoky et al., 2021).

Em relação a forma de aplicação de Se, relata-se que o tratamento de sementes com Se tem respostas semelhantes ao fertilizante aplicado diretamente no solo. Todavia, a aplicação foliar é a forma de aplicação de fertilizante mais eficaz com resultados 2x mais eficientes do que a aplicação do fertilizante no solo (Ros et al., 2016). No geral, a pulverização foliar provou ser o método mais estudado,

proporcionando benefícios às plantas por meio do uso de baixas doses de Se e pela facilidade de operacionalizar a adubação foliar em planta de arroz (*Oryza sativa* L.) e trigo (*Triticum aestivum* L.) (Kalaei et al., 2022). Nas plantas, existem várias estruturas de entrada para a absorção de Se pelas folhas que aumenta a eficiência da adubação, como: tricomas, estômatos, estigmas e hidatódios (Niu et al., 2021). Por outro lado, eficiência da fertilização via solo é reduzida em função das interações do Se com colóides do solo, matéria orgânica e antagonismo com outros elementos (Dinh et al., 2019).

Quanto a época de aplicação de fertilizantes, sabe-se que a aplicação no estágio de pleno desenvolvimento das culturas agrícolas tem maior resposta na absorção com aumento de até 2000%, enquanto antes da primavera o aumento na absorção de Se foi de 900% (Ros et al., 2016). A época de crescimento vegetativo coincide com a máxima taxa de crescimento e de absorção de nutrientes (Penuelas e Sardans, 2021), o que gera bons resultados de acúmulo de Se nas partes comestíveis das plantas na colheita.

De modo geral, a maioria dos experimentos que tiveram resultados positivos, utilizaram aplicações de fertilizantes foliares durante a fase vegetativa das lavouras, possibilitando estímulo do crescimento e a rápida absorção do Se aplicado. Contudo, a estratégia de Se-biofortificação é variável em função da cultura-alvo, clima e tipo de solo, o que gera uma lacuna na qual deve ser esclarecida com futuras pesquisas para definir e ajustar o manejo da adubação com Se em diferentes espécies de plantas cultivadas.

#### **2.4.2 Biodisponibilidade de selênio em plantas biofortificadas e bioativos**

O Se tem efeito duplo em programas de biofortificação, pois além de promover o enriquecimento de Se nas partes comestíveis, tem-se relatado que a doses moderadas do elemento estimula a produção de compostos bioativos em alimentos funcionais. Vários estudos foram realizados para demonstrar o efeito do tratamento com selênio nas mudanças na composição química de extratos de plantas e suas propriedades antioxidantes e anticancerígenas (Lanza et al., 2021; Kieliszek et al., 2022).

A SeMet e SeCys são as principais formas biológicas de Se encontradas nos alimentos biofortificados com Se, sendo a SeMet mais absorvida que a SeCys (Galić et al., 2021). Também é encontrado nos alimentos a SeMeCys e formas inorgânicas, como o selenato e selenito, mas em menor quantidade (Kieliszek et al., 2022). A grande maioria do Se no organismo humano está presente na forma de selenoproteínas por meio das quais exercem suas funções biológicas essenciais (Guillin et al., 2022). Em geral, os compostos contendo Se são mais biodisponíveis do que os inorgânicos, e o Se das plantas demonstrou ser mais biodisponível do que o Se dos alimentos de origem animal (Silva et al., 2017; Pyrzynska e Sentkowska, 2021)

A SeMet é predominante nos cereais com concentrações de Se que variam de 0,01 a 0,55  $\mu\text{g g}^{-1}$  de peso fresco (dos Santos et al., 2017). SeMet é o principal selenocomposto presente em grãos de cereais e leguminosas (Xie et al., 2021). O Se biodisponível nas partes comestíveis das plantas são diferencialmente acumuladas principalmente pela classe que as plantas pertencem, tendo plantas cultivadas não acumuladoras e acumuladoras de Se (Irish et al., 2023). Por exemplo, plantas da família das Brassicas (couve-flor, o repolho, brócolis, couve-manteiga, couve de bruxelas, mostarda, nabo, agrião, rabanete e rúcula), *Allium* (cebolas, alhos, cebolinhas e alho-poró) e castanha-do-brasil são plantas acumuladoras de Se, enquanto grão e leguminosas geralmente são não acumuladoras de Se, mas este último é o mais consumido pela população (Gorini et al., 2021; Hossain et al., 2021) .

Certamente, a disponibilidade de Se no solo tem impacto no acúmulo e biodisponibilidade de Se nas plantas, seja elas acumuladoras ou não acumuladoras (Ari et al., 2022). Por exemplo, a castanha-do-brasil tem concentração de Se que varia de acordo com a disponibilidade no solo, sendo que as castanhas das árvores do centro do Brasil contêm 10 vezes mais Se do que as árvores do oeste do Brasil (Silva Junior et al., 2017). No caso específico da castanha-do-brasil ela acumula grandes quantidades de Se devido as especificidades proteicas da espécie que é rica em aminoácidos contendo enxofre, a qual é substituída não especificamente por Se, estimulando a síntese de SeMet em detrimento da forma com enxofre, Met (Alcântara et al., 2022).

Dessa forma, mostra-se que a biofortificação dos alimentos é um caminho essencial para a nutrição humana. A fim de reduzir a deficiência de Se em regiões suscetíveis, vários países com baixo teor de Se, incluindo Finlândia, Reino Unido, Nova Zelândia, Malawi, partes da China, Tibete e Brasil, desenvolveram culturas com alto teor de Se usando intervenções de biofortificação (Alfthan et al., 2015; Reis et al., 2017; Joy et al., 2019; Mateus et al., 2021; Silva et al., 2019; Wu et al., 2015). O exemplo do sucesso da biofortificação ocorreu na Nova Zelândia e Finlândia onde o Se foi adicionado nos fertilizantes minerais convencionais, o que aumentou o Se nos alimentos para suprir a demanda dietética do elemento para os seres humanos (Hossain et al., 2021).

O efeito da biofortificação do Se no acúmulo de compostos bioativos é essencial para disponibilizar alimentos funcionais para a dieta humana. A Se-biofortificação tem aumentado a concentração de flavonoides nas partes comestíveis de brócolis (Bachiega et al., 2016; Tian et al., 2016), chá (Xiang et al., 2022), milho (Khalil et al., 2022) e amendoim (Cunha et al., 2022). A biofortificação com Se tem aumentado a concentração de compostos fenólicos totais em diversas culturas como o manjericão (Puccinelli et al., 2020), alface (Pannico et al., 2019), e tomate (Malagoli et al., 2015). Possivelmente, uma das razões para o aumento do teor de fenólicos e flavonoides totais se deve ao papel do elemento no aumento da atividade da enzima fenilalanina amônia liase, que é fundamental para a biossíntese de compostos fenólicos e flavonoides nas plantas (Saeedi et al., 2021).

A aplicação de Se em doses moderadas também tem sido associada com aumento de pigmentos fotossintéticos como a clorofila a, clorofila b, carotenoides e antocianina nas partes comestíveis de alface (Pyrzynska e Sentkowska, 2021), trigo (Zhang et al., 2022) e batata (Somalraju et al., 2022). Segundo Silva et al. (2020) o Se atua protegendo o complexo antena pelo estímulo do metabolismo antioxidante e estímulo da biossíntese de pigmentos fotoprotetores. Além disso, o Se estimula a biossíntese de ácido ascórbico (Vitamina C) nas partes comestíveis de alface, manjericão e repolho (Chao et al., 2022; Pyrzynska e Sentkowska, 2021; Skrypnik et al., 2019). Adicionalmente, a aplicação de Se estimula a biossíntese de tocoferol (Vitamina E), porém não há relatos do efeito da biofortificação com Se sobre o acúmulo de tocoferol nas partes comestíveis das plantas. O estímulo da produção de

ácido ascórbico e tocoferol ocorre devido o efeito do Se para promover a biossíntese de compostos não enzimáticos para detoxificação de EROS (Lanza e Reis, 2021).

Segundo Bachiega et al. (2016) e Huang et al. (2016) plantas de brócolis biofortificadas com Se apresentam maior capacidade anticancerígena, pois o Se estimula o metabolismo secundário e a produção de glucosinato (GSL), incluindo glucorafanina, que é um GSL alifático principal em crucíferas e o precursor do composto anticancerígeno sulforafano. Vários estudos epidemiológicos também mostraram que o sulforafano pode efetivamente prevenir o câncer (Bouranis et al., 2021; Marino et al., 2021). Dessa forma, o estímulo do metabolismo antioxidante associado à atividade anticarcinogênica do sulforano, apontam-se que alimentos ricos em Se são capazes de atuar na prevenção do câncer, doenças cardiovasculares e neurodegenerativas (Kamal et al., 2022; Wei et al., 2022).

## **2.5 Conclusões e perspectivas futuras**

Na revisão apresentada, foi possível notar que a fertilização com Se orgânico é ineficiente, enquanto os inorgânicos de selênio, como selenato e selenito, foram mais absorvidos pelas plantas, mas as fontes de nanopartículas de selenato e selenato foram particularmente proeminentes. A aplicação foliar de Se é uma estratégia para evitar perdas por interações de Se com o solo e outros elementos por meio de transportadores de membrana. A maioria dos estudos mostra que uma dose baixa de Se  $40 \text{ g ha}^{-1}$  reflete de forma mais eficaz os benefícios da aplicação de Se na agricultura. O Se é um elemento capaz de potencializar o sistema antioxidante por aumentar as atividades de enzimas (superóxido dismutase, catalase e ascorbato peroxidase) e não enzimáticas (ácido ascórbico, flavonoides e tocoferóis), permitindo assim que as plantas sejam capazes de desintoxicar de espécies reativas de oxigênio.

Dessa forma, o Se atenua os efeitos das mudanças climáticas e dos poluentes ambientais, como altas temperaturas, secas, radiação UV-B, salinidade, metais pesados e fitotoxicidade de herbicidas. O mecanismo de interação iônica antagônica entre o selênio e os principais metais pesados, como chumbo, cádmio, mercúrio e arsênico, também minimiza os efeitos nocivos dos metais pesados. Além disso, o tratamento com Se induziu o mecanismo de compartimentalização de metais pesados

e inibiu a absorção e transporte desses metais pesados para as partes comestíveis das plantas. O uso de Se em culturas tem sido associado ao aumento da biodisponibilidade de selênio em alimentos na forma de selenometionina e selenocisteína.

Por fim, o tratamento com selênio aumenta a concentração de compostos bioativos, prevenindo assim o câncer, doenças cardiovasculares e doenças neurodegenerativas. Os benefícios de alimentos enriquecidos com Se via biofortificação agrônômica ocorre devido ao estímulo da biossíntese de antioxidantes como flavonóides, carotenóides, antocianinas, ácido ascórbico (vitamina C), tocoferóis (vitamina E) e glicosídeos (glucorafanina e sulforafano).

A presente revisão mostra grandes avanços sobre os estudos do Se na ciência básica de plantas, porém também mostra que a fronteira do conhecimento sobre o assunto deve ser rompida a fim de explorar tais benefícios para culturas de importância para a segurança alimentar e energética global. Estudos mais práticos sobre fonte, dose, momento e modalidade de aplicação para diversas culturas em situação de campo e estufa são necessários para a sustentabilidade da agricultura contemporânea frente às mudanças climáticas globais e poluentes cada vez mais intensos e desafiantes para a produção de alimentos.

## 2.6 Referências

Abdelhakim LOA, Rosenqvist E, Wollenweber B, Spyroglou I, Ottosen C-O, Panzarová K (2021) Investigating Combined Drought- and Heat Stress Effects in Wheat under Controlled Conditions by Dynamic Image-Based Phenotyping. **Agronomy** 11:364. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020364>

Afzal B, Naaz H, Sami N, Yasin D, Khan NJ, Fatma T (2022) Mitigative effect of biosynthesized SeNPs on cyanobacteria under paraquat toxicity. **Chemosphere** 293:133562. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133562>

Ahmad W, Alharthy RD, Zubair M, Ahmed M, Hameed A, Rafique S (2021a) Toxic and heavy metals contamination assessment in soil and water to evaluate human health risk. **Scientific Report** 11:1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94616-4>

Ahmad Z, Anjum S, Skalicky M, Waraich EA, Tariq RMS, Ayub MA, Hossain A, Hassan MM, Brestic M, Islam MS, Habib-Ur-rahman M, Wasaya A, Iqbal MA, El Sabagh A (2021b) Selenium alleviates the adverse effect of drought in oilseed crops camelina (*Camelina sativa* L.) and canola (*Brassica napus* L.). **Molecules** 26. <https://doi.org/10.3390/molecules26061699>

Akbulut GB, Yigit E, Kaya A, Aktas A (2018) Effects of salicylic acid and organic selenium on wheat (*Triticum aestivum* L.) exposed to fenoxaprop-p-ethyl. **Ecotoxicology Environmental Safety** 148:901–909. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.053>

Alcântara DB, Dionísio AP, Artur AG, Silveira BKS, Lopes AF, Guedes JAC, Luz LR, Nascimento RF, Lopes GS, Hermsdorff HHM, Zocolo GJ (2022) Selenium in Brazil nuts: An overview of agronomical aspects, recent trends in analytical chemistry, and health outcomes. **Food Chemistry** 372. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131207>

Alfthan G, Eurola M, Ekholm P, Venäläinen ER, Root T, Korkalainen K, Hartikainen H, Salminen P, Hietaniemi V, Aspila P, Aro A (2015) Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: From deficiency to optimal selenium status of the population. **Journal Trace Elemental Medicine Biology** 31:142–147. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2014.04.009>

Ali NM, Al-Taey DKA, Altaee NH (2021a) The Impact of Selenium, Nano (SiO<sub>2</sub>) and Organic Fertilization on growth and yield of Potato *Solanum tuberosum* L. Under Salt Stress Conditions. **IOP Conference Ser Earth Environmental Science** 735:1–6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/735/1/012042>

Ali W, Zhang H, Junaid M, Mao K, Xu N, Chang C, Rasool A, Wajahat Aslam M, Ali J, Yang Z (2021b) Insights into the mechanisms of arsenic-selenium interactions and the associated toxicity in plants, animals, and humans: A critical review. **Critical Review Environmental Science Technology** 51:704–750. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1740042>

Alves LR, Prado ER, de Oliveira R, Santos EF, Lemos de Souza I, dos Reis AR, Azevedo RA, Gratão PL (2020) Mechanisms of cadmium-stress avoidance by

selenium in tomato plants. **Ecotoxicology** 29:594–606.  
<https://doi.org/10.1007/s10646-020-02208-1>

Aqib M, Nawaz F, Majeed S, Ghaffar A, Ahmad KS, Shehzad MA, Tahir MN, Aurangzaib M, Javeed HMR, Habib-ur-Rahman M, Usmani MM (2021) Physiological insights into sulfate and selenium interaction to improve drought tolerance in mung bean. **Physiology Molecule Biology Plants** 27:1073–1087.  
<https://doi.org/10.1007/s12298-021-00992-6>

Arı B, Öz E, Can SZ, Bakırdere S (2022) Bioaccessibility and bioavailability of selenium species in Se-enriched leeks (*Allium Porrum*) cultivated by hydroponically. **Food Chemistry** 372:131314. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131314>

Arora NK (2019) Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. **Environmental Sustainability** 2:95–96.  
<https://doi.org/10.1007/s42398-019-00078-w>

Ashraf MA, Akbar A, Parveen A, Rasheed R, Hussain I, Iqbal M (2018) Phenological application of selenium differentially improves growth, oxidative defense and ion homeostasis in maize under salinity stress. **Plant Physiology Biochemistry** 123:268–280. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.12.023>

Astaneh RK, Bolandnazar S, Nahandi FZ, Oustan S (2019) Effects of selenium on enzymatic changes and productivity of garlic under salinity stress. **South African Journal Botany** 121:447–455. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.10.037>

Ayub M, Ashraf MY, Kausar A, Saleem S, Anwar S, Altay V, Ozturk M (2021) Growth and physio-biochemical responses of maize (*Zea mays* L.) to drought and heat stresses. **Plant Biosystem** 155:535–542.  
<https://doi.org/10.1080/11263504.2020.1762785>

Bachiega P, Salgado JM, De Carvalho JE, Ruiz ALTG, Schwarz K, Tezotto T, Morzelle MC (2016) Antioxidant and antiproliferative activities in different maturation stages of broccoli (*Brassica oleracea* Italica) biofortified with selenium. **Food Chemistry** 190:771–776. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.06.024>

Badawy SA, Zayed BA, Bassiouni SMA, Mahdi AHA, Majrashi A, Ali EF, Seleiman MF (2021) Influence of nano silicon and nano selenium on root characters, growth, ion selectivity, yield, and yield components of rice (*Oryza sativa* L.) under salinity conditions. **Plants** 10. <https://doi.org/10.3390/plants10081657>

Bai F, Jia Y, Li J, Wu Z, Li L, Song L (2023) Paraquat induces different programmed cell death patterns in *Microcystis aeruginosa* and *Chlorella luteoviridis*.

**Ecotoxicology Environmental Safety** 249:114429.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114429>

Behzadi Rad P, Roozban MR, Karimi S, Ghahremani R, Vahdati K (2021) Osmolyte accumulation and sodium compartmentation has a key role in salinity tolerance of pistachios rootstocks. **Agriculture** 11:1-14.

<https://doi.org/10.3390/agriculture11080708>

Bouranis JA, Beaver LM, Choi J, Wong CP, Jiang D, Sharpton TJ, Stevens JF, Ho E (2021) Article composition of the gut microbiome influences production of sulforaphane-nitrile and iberin-nitrile from glucosinolates in broccoli sprouts. **Nutrients** 13:1-14.

<https://doi.org/10.3390/nu13093013>

Brigelius-Flohé R (2018) Selenium in human health and disease: An overview.

**Molecule Integrative Toxicology** 14:3–26. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95390-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95390-8_1)

Carey AM, Scheckel KG, Lombi E, Newville M, Choi Y, Norton GJ, Price AH, Meharg AA (2012) Grain accumulation of selenium species in rice (*Oryza sativa* L.).

**Environmental Science Technology** 46:5557–5564.

<https://doi.org/10.1021/es203871j>

Chandra S, Roychoudhury A (2020) Role of Selenium and Manganese in Mitigating Oxidative Damages. *Prot Chem Agents Amelior Plant Abiotic Stress* 597–621. <https://doi.org/10.1002/9781119552154.ch30>

Chao W, Rao C, Chen Q, Zhang W, Liao Y, Ye J, Cheng S, Yang X, Xu F (2022) Advances in Research on the Involvement of Selenium in Regulating Plant Ecosystems. **Plants** 11:1–12

Chauhan R, Awasthi S, Srivastava S, Dwivedi S, Pilon-Smits EAH, Dhankher OP, Tripathi RD (2019) Understanding selenium metabolism in plants and its role as a beneficial element. **Critical Review Environmental Science Technology** 49:1937–1958. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1598240>

Chen Y, Gao Y, Wu S, Zhang L, Wang Q, Yao X, Gao H (2022) Wet deposition of atmospheric selenium and sensitivity to emission and precipitation patterns.

**Science**                      **Total**                      **Environmental**                      835:155402.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155402>

Cheng M, Wang H, Fan J, Wang X, Sun X, Yang L, Zhang S, Xiang Y, Zhang F (2021) Crop yield and water productivity under salty water irrigation: A global meta-analysis. **Agriculture Water Management** 256:107105.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107105>

Cohen I, Zandalinas SI, Fritschi FB, Sengupta S, Fichman Y, Azad RK, Mittler R (2021) The impact of water deficit and heat stress combination on the molecular response, physiology, and seed production of soybean. **Physiology Plant** 172:41–52.  
<https://doi.org/10.1111/ppl.13269>

Corwin DL (2021) Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. **European Journal Soil Science** 72:842–862. <https://doi.org/10.1111/ejss.13010>

Costa MVJ Da, Ramegowda Y, Ramegowda V, Karaba NN, Sreeman SM, Udayakumar M (2021) Combined Drought and Heat Stress in Rice: Responses, Phenotyping and Strategies to Improve Tolerance. **Rice Science** 28:233–242.  
<https://doi.org/10.1016/j.rsci.2021.04.003>

Cui Y, Ouyang S, Zhao Y, Tie L, Shao C, Duan H (2022) Plant responses to high temperature and drought: A bibliometrics analysis. **Frontiers Plant Science** 13.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1052660>

Cunha MLO, Oliveira LCA de, Silva VM, Montanha GS, Reis AR dos (2022) Selenium increases photosynthetic capacity, daidzein biosynthesis, nodulation and yield of peanuts plants (*Arachis hypogaea* L.). **Plant Physiology Biochemistry** 190:231–239. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.08.006>

Das S, Majumder B, Biswas AK (2022) Selenium alleviates arsenic induced stress by modulating growth, oxidative stress, antioxidant defense and thiol metabolism in rice seedlings. **International Journal Phytoremediation** 24:763–777.  
<https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1975639>

de Sousa GF, Silva MA, de Morais EG, Van Opbergen GAZ, Van Opbergen GGAZ, de Oliveira RR, Amaral D, Brown P, Chalfun-Junior A, Guilherme LRG (2022) Selenium enhances chilling stress tolerance in coffee species by modulating nutrient, carbohydrates, and amino acids content. **Frontiers Plant Science** 13:1–15.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1000430>

Desoky ESM, Merwad ARMA, Abo El-Maati MF, Mansour E, Arnaout SMAI, Awad MF, Ramadan MF, Ibrahim SA (2021) Physiological and biochemical mechanisms of exogenously applied selenium for alleviating destructive impacts induced by salinity stress in bread wheat. **Agronomy** 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050926>

Dhaliwal SS, Sharma V, Shukla AK, Verma V, Kaur M, Shivay YS, Nisar S, Gaber A, Brestic M, Barek V, Skalicky M, Ondrisik P, Hossain A (2022) Biofortification—A Frontier Novel Approach to Enrich Micronutrients in Field Crops to Encounter the Nutritional Security. **Molecules** 27. <https://doi.org/10.3390/molecules27041340>

Di X, Qin X, Zhao L, Liang X, Xu Y, Sun Y, Huang Q (2023) Selenium distribution, translocation and speciation in wheat (*Triticum aestivum* L.) after foliar spraying selenite and selenate. **Food Chemistry** 400:134077. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134077>

Dias MC, Pinto DCGA, Silva AMS (2021) Plant flavonoids: Chemical characteristics and biological activity. **Molecules** 26:1–16. <https://doi.org/10.3390/molecules26175377>

Dinh QT, Wang M, Tran TAT, Zhou F, Wang D, Zhai H, Peng Q, Xue M, Du Z, Bañuelos GS, Lin ZQ, Liang D (2019) Bioavailability of selenium in soil-plant system and a regulatory approach. **Critical Review Environmental Science Technology** 49:443–517. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1550987>

Do Nascimento Da Silva E, Aureli F, D'Amato M, Raggi A, Cadore S, Cubadda F (2017) Selenium Bioaccessibility and Speciation in Selenium-Enriched Lettuce: Investigation of the Selenocompounds Liberated after in Vitro Simulated Human Digestion Using Two-Dimensional HPLC-ICP-MS. **Journal Agriculture Food Chemistry** 65:3031–3038. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b01188>

Reis AR, El-Ramady H, Santos EF, Gratão PL, Schomburg L (2017) Overview of Selenium Deficiency and Toxicity Worldwide: Affected Areas, Selenium-Related Health Issues, and Case Studies. **Plant Ecophysiology** 11:209–230. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56249-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56249-0_13)

Santos M, da Silva Júnior FMR, Muccillo-Baisch AL (2017) Selenium content of Brazilian foods: A review of the literature values. **Journal Food Compos Anal** 58:10–15. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.01.001>

El Mehdawi AF, Jiang Y, Guignardi ZS, Esmat A, Pilon M, Pilon-Smits EAH, Schiavon M (2018) Influence of sulfate supply on selenium uptake dynamics and expression of sulfate/selenate transporters in selenium hyperaccumulator and nonhyperaccumulator Brassicaceae. **New Phytologist** 217:194–205. <https://doi.org/10.1111/nph.14838>

Elkelish AA, Soliman MH, Alhaithloul HA, El-Esawi MA (2019) Selenium protects wheat seedlings against salt stress-mediated oxidative damage by up-regulating antioxidants and osmolytes metabolism. **Plant Physiology Biochemistry** 137:144–153. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.02.004>

Eswar D, Karuppusamy R, Chellamuthu S (2021) Drivers of soil salinity and their correlation with climate change. **Current Opinion Environmental Sustainability** 50:310–318. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.10.015>

Feinberg A, Feinberg A, Feinberg A, Stenke A, Peter T, Winkel LHE, Winkel LHE (2020) Constraining Atmospheric Selenium Emissions Using Observations, Global Modeling, and Bayesian Inference. **Environmental Science Technology** 54:7146–7155. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01408>

Feng R, Wei C, Tu S (2013) The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. **Environmental Experimental Botany** 87:58–68. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.09.002>

Feng RW, Wang LZ, Yang JG, Zhao PP, Zhu YM, Li YP, Yu YS, Liu H, Rensing C, Wu ZY, Ni RX, Zheng SA (2021a) Underlying mechanisms responsible for restriction of uptake and translocation of heavy metals (metalloids) by selenium via root application in plants. **Journal Hazard Materials** 402. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123570>

Feng RW, Zhao PP, Zhu YM, Yang JG, Wei XQ, Yang L, Liu H, Rensing C, Ding YZ (2021b) Application of inorganic selenium to reduce accumulation and toxicity of heavy metals (metalloids) in plants: The main mechanisms, concerns, and risks. **Science Total Environmental** 771:144776. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144776>

Ferreira RLU, Sena-Evangelista KCM, de Azevedo EP, Pinheiro FI, Cobucci RN, Pedrosa LFC (2021) Selenium in Human Health and Gut Microflora: Bioavailability of Selenocompounds and Relationship With Diseases. **Frontiers Nutrition** 8. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.685317>

Galić L, Vinković T, Ravnjak B, Lončarić Z (2021) Agronomic biofortification of significant cereal crops with selenium—a review. **Agronomy** 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy11051015>

Garza-García JJO, Hernández-Díaz JA, Zamudio-Ojeda A, León-Morales JM, Guerrero-Guzmán A, Sánchez-Chiprés DR, López-Velázquez JC, García-Morales S (2022) The Role of Selenium Nanoparticles in Agriculture and Food Technology. **Biology Trace Elements** 200:2528–2548. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-02847-3>

Ghatrehsamani S, Jha G, Dutta W, Molaei F, Nazrul F, Fortin M, Bansal S, Debangshi U, Neupane J (2023) Artificial Intelligence Tools and Techniques to Combat Herbicide Resistant Weeds — A Review. **Weed Science** 1:1–18

Ghosh A, Mustafiz A, Pareek A, Sopory SK, Singla-Pareek SL (2022) Glyoxalase III enhances salinity tolerance through reactive oxygen species scavenging and reduced glycation. **Physiology Plant** 174. <https://doi.org/10.1111/ppl.13693>

Golob A, Kavčič J, Stibilj V, Gaberščik A, Vogel-Mikuš K, Germ M (2017) The effect of selenium and UV radiation on leaf traits and biomass production in *Triticum aestivum* L. **Ecotoxicology Environmental Safety** 136:142–149. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.11.007>

Golob A, Stibilj V, Kreft I, Vogel-Mikuš K, Gaberščik A, Germ M (2018) Selenium treatment alters the effects of UV radiation on chemical and production parameters in hybrid buckwheat. **Acta Agriculture Scand Sect B Soil Plant Science** 68:5–15. <https://doi.org/10.1080/09064710.2017.1349172>

Golubkina NA, Folmanis GE, Tananaev IG, Krivenkov L V., Kosheleva O V., Soldatenko A V. (2017) Comparative Evaluation of Spinach Biofortification with Selenium Nanoparticles and Ionic Forms of the Element. **Nanotechnologies Russ** 12:569–576. <https://doi.org/10.1134/S1995078017050032>

Gorini F, Sabatino L, Pingitore A, Vassalle C (2021) Selenium: An element of life essential for thyroid function. **Molecules** 26:1–14. <https://doi.org/10.3390/molecules26237084>

Gu X, Wen X, Yi N, Liu Y, Wu J, Li H, Liu G (2022) Effect of foliar application of silicon, selenium and zinc on heavy metal accumulation in wheat grains in field studies. **Environmental Pollution Bioavailable** 34:246–252. <https://doi.org/10.1080/26395940.2022.2085630>

Guillin OM, Vindry C, Ohlmann T, Chavatte L (2022) Interplay between Selenium, Selenoproteins and HIV-1 Replication in Human CD4 T-Lymphocytes. **International Journal Molecule Science** 23. <https://doi.org/10.3390/ijms23031394>

Han D, Tu S, Dai Z, Huang W, Jia W, Xu Z, Shao H (2022) Comparison of selenite and selenate in alleviation of drought stress in *Nicotiana tabacum* L. **Chemosphere** 287:132136. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132136>

Hasanuzzaman M, Borhannuddin Bhuyan MHM, Anee TI, Parvin K, Nahar K, Al Mahmud J, Fujita M (2019) Regulation of ascorbate-glutathione pathway in mitigating oxidative damage in plants under abiotic stress. **Antioxidants** 8:1-14. <https://doi.org/10.3390/antiox8090384>

Hassani A, Azapagic A, Shokri N (2021) Global predictions of primary soil salinization under changing climate in the 21st century. **Nature Communication** 12:1–17. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26907-3>

Hossain A, Skalicky M, Brestic M, Maitra S, Sarkar S, Ahmad Z, Vemuri H, Garai S, Mondal M, Bhatt R, Kumar P, Banerjee P, Saha S, Islam T, Laing AM (2021) Selenium biofortification: Roles, mechanisms, responses and prospects. **Molecules** 26. <https://doi.org/10.3390/molecules26040881>

Hosseinzadeh Rostam Kalaei M, Abdossi V, Danaee E (2022) Evaluation of foliar application of selenium and flowering stages on selected properties of Iranian Borage as a medicinal plant. **Scientific Report** 12:1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16241-z>

Huang K, Lin JC, Wu QY, Yan JY, Liu MY, Zhang S, Xiao WJ (2016) Changes in Sulforaphane and Selenocysteine Methyltransferase Transcript Levels in Broccoli Treated with Sodium Selenite. **Plant Molecule Biology Report** 34:807–814. <https://doi.org/10.1007/s11105-015-0960-0>

Iqbal MN, Rasheed R, Ashraf MY, Ashraf MA, Hussain I (2018) Exogenously applied zinc and copper mitigate salinity effect in maize (*Zea mays* L.) by improving key physiological and biochemical attributes. **Environmental Science Pollution** 25:23883–23896. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2383-6>

Irato P, Santovito G (2021) Enzymatic and non-enzymatic molecules with antioxidant function. **Antioxidants** 10:1-15. <https://doi.org/10.3390/antiox10040579>

Ismael MA, Elyamine AM, Zhao YY, Moussa MG, Rana MS, Afzal J, Imran M, Zhao XH, Hu CX (2018) Can selenium and molybdenum restrain cadmium toxicity to pollen grains in brassica napus? **International Journal Molecule Science** 19:1-14. <https://doi.org/10.3390/ijms19082163>

Jiang C, Zu C, Lu D, Zheng Q, Shen J, Wang H, Li D (2017) Effect of exogenous selenium supply on photosynthesis, Na<sup>+</sup> accumulation and antioxidative capacity of maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. **Scientific Report** 7:1–14. <https://doi.org/10.1038/srep42039>

Jones GD, Droz B, Greve P, Gottschalk P, Poffet D, McGrath SP, Seneviratne SI, Smith P, Winkel LHE (2017) Selenium deficiency risk predicted to increase under future climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences** 114:2848–2853. <https://doi.org/10.1073/pnas.1611576114>

Joy EJM, Kalimbara AA, Gashu D, Ferguson EL, Sturgess J, Dangour AD, Banda L, Chiutsi-Phiri G, Bailey EH, Langley-Evans SC, Lark RM, Millar K, Young SD, Matandika L, Mfutso-Bengo J, Phuka JC, Phiri FP, Gondwe J, Ander EL, Lowe NM, Nalivata PC, Broadley MR, Allen E (2019) Can selenium deficiency in Malawi be alleviated through consumption of agro-biofortified maize flour? Study protocol for a randomised, double-blind, controlled trial. **Trials** 20:1–9. <https://doi.org/10.1186/s13063-019-3894-2>

Kamal RM, Razis AFA, Sukri NSM, Perimal EK, Ahmad H, Patrick R, Djedaini-Pilard F, Mazzon E, Rigaud S (2022) Beneficial Health Effects of Glucosinolates-Derived Isothiocyanates on Cardiovascular and Neurodegenerative Diseases. **Molecules** 27:1–49. <https://doi.org/10.3390/molecules27030624>

Khalil R, Yusuf M, Bassuony F, Haroun S, Gamal A (2022) Alpha-tocopherol reinforce selenium efficiency to ameliorates salt stress in maize plants through carbon

metabolism, enhanced photosynthetic pigments and ion uptake. **South African Journal Botany** 144:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.08.033>

Kieliszek M, Bano I, Zare H (2022) A Comprehensive Review on Selenium and Its Effects on Human Health and Distribution in Middle Eastern Countries. **Biology Trace Element Res** 200:971–987. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-02716-z>

Kushwaha A, Goswami L, Lee J, Sonne C, Brown RJC, Kim KH (2022) Selenium in soil-microbe-plant systems: Sources, distribution, toxicity, tolerance, and detoxification. **Critical Review Environmental Science Technology** 52:2383–2420. <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1883187>

Lanza MGDB, Reis AR dos (2021) Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. **Plant Physiology Biochemistry** 164:27–43. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.026>

Li J, Liu R, Zhang C, Yang J, Lyu L, Shi Z, Man YB, Wu F (2022) Selenium uptake and accumulation in winter wheat as affected by level of phosphate application and arbuscular mycorrhizal fungi. **Journal Hazard Materials** 433:128762. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128762>

Li Y, Zhu N, Liang X, Zheng L, Zhang C, Li YF, Zhang Z, Gao Y, Zhao J (2020) A comparative study on the accumulation, translocation and transformation of selenite, selenate, and SeNPs in a hydroponic-plant system. **Ecotoxicology Environmental Safety** 189:109955. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109955>

Li Z, Liang D, Peng Q, Cui Z, Huang J, Lin Z (2017) Interaction between selenium and soil organic matter and its impact on soil selenium bioavailability: A review. **Geoderma** 295:69–79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.02.019>

Liu K, Li S, Han J, Zeng X, Ling M, Mao J, Li Y, Jiang J (2021) Effect of selenium on tea (*Camellia sinensis*) under low temperature: Changes in physiological and biochemical responses and quality. **Environmental Experimental Botany** 188:104475. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104475>

Liu M, Cao W, Gao P, Zhao J, Muhammad U, Ni S, Zhou Y, Wang S, Pei F, Zhang Z, Yuan L, Wang Z, Cui A, Chen Z, Feng Z, Hu K, Chen H, Zuo S (2022) Effects of two different selenium fertilizers on accumulation of selenium and heavy metals in rice grains in field trials. **Food Science Technology** 42:1–9. <https://doi.org/10.1590/fst.117521>

Lončarić Z, Ivezić V, Kerovec D, Rebekić A (2021) Foliar Zinc-Selenium and Nitrogen Fertilization Affects Content of Zn, Fe, Se, P, and Cd in Wheat Grain. **Plants** 10:1549. <https://doi.org/10.3390/plants10081549>

Ludwiczak A, Osiak M, Cárdenas-Pérez S, Lubińska-Mielińska S, Piernik A (2021) Osmotic stress or ionic composition: Which affects the early growth of crop species more? **Agronomy** 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030435>

Luo L, Zhang J, Zhang K, Wen Q, Ming K, Xiong H, Ning F (2021) Peanut selenium distribution, concentration, speciation, and effects on proteins after exogenous selenium biofortification. **Food Chemistry** 354:129515. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129515>

Malagoli M, Schiavon M, Dall'Acqua S, Pilon-Smits EAH (2015) Effects of selenium biofortification on crop nutritional quality. **Frontiers Plant Science** 6:1–5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00280>

Malcheska F, Ahmad A, Batool S, Müller HM, Ludwig-Müller J, Kreuzwieser J, Randewig D, Hänsch R, Mendel RR, Hell R, Wirtz M, Geiger D, Ache P, Hedrich R, Herschbach C, Rennenberg H (2017) Drought-enhanced xylem sap sulfate closes stomata by affecting ALMT12 and guard cell ABA synthesis. **Plant Physiology** 174:798–814. <https://doi.org/10.1104/pp.16.01784>

Malhi GS, Kaur M, Kaushik P (2021) Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. **Sustainability** 13:1–21. <https://doi.org/10.3390/su13031318>

Marino M, Martini D, Venturi S, Tucci M, Porrini M, Riso P, Del Bo' C (2021) An Overview of Registered Clinical Trials on Glucosinolates and Human Health: The Current Situation. **Frontiers Nutrition** 8:1-15. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.730906>

Marques AC, Pessoa CC, Coelho ARF, Luís IC, Daccak D, Campos PS, Simões M, Almeida AS, Pessoa MF, Reboredo FH, Guerra M, Leitão RG, Ramalho JC, Marques P, Silva MM, Legoinha P, Pais IP, Lidon F (2021) Rice (*Oryza sativa* L.) Biofortification with Selenium: Enrichment Index and Interactions among **Nutrients**. 39:1-14. <https://doi.org/10.3390/iecps2020-08701>

Mateus MP de B, Tavanti RFR, Tavanti TR, Santos EF, Jalal A, Reis AR dos (2021) Selenium biofortification enhances ROS scavenge system increasing yield of

coffee plants. **Ecotoxicology Environmental Safety** 209. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111772>

Mittler R, Zandalinas SI, Fichman Y, Van Breusegem F (2022) Reactive oxygen species signalling in plant stress responses. **Nature Review Molecule Cell Biology** 23. <https://doi.org/10.1038/s41580-022-00499-2>

Naaz H, Yasin D, Afzal B, Sami N, Khan NJ, Fatma T (2021) Exogenous salicylic acid mediated herbicide (Paraquat) resistance in cyanobacterial biofertilizer *Microchaete* sp. NCCU-342. **Environmental Science Pollution Res.** <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15378-0>

Nawaz MA, Zakharenko AM, Zemchenko IV, Haider MS, Ali MA, Imtiaz M, Chung G, Tsatsakis A, Sun S, Golokhvast KS (2019) Phytolith formation in plants: From soil to cell. **Plants** 8:1–38. <https://doi.org/10.3390/plants8080249>

Newman R, Waterland N, Moon Y, Tou JC (2019) Selenium Biofortification of Agricultural Crops and Effects on Plant Nutrients and Bioactive Compounds Important for Human Health and Disease Prevention – a Review. **Plant Foods Hum Nutrition** 74:449–460. <https://doi.org/10.1007/s11130-019-00769-z>

Niu J, Liu C, Huang M, Liu K, Yan D (2021) Effects of Foliar Fertilization: a Review of Current Status and Future Perspectives. **Journal Soil Science Plant Nutrition** 21:104–118. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00346-3>

Ortiz-Bobea A, Ault TR, Carrillo CM, Chambers RG, Lobell DB (2021) Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. **Nature** 11:306–312. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1>

Pannico A, El-Nakhel C, Kyriacou MC, Giordano M, Stazi SR, De Pascale S, Roupheal Y (2019) Combating Micronutrient Deficiency and Enhancing Food Functional Quality Through Selenium Fortification of Select Lettuce Genotypes Grown in a Closed Soilless System. **Frontiers Plant Science** 10:1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01495>

Penuelas J, Sardans J (2021) Developing holistic models of the structure and function of the soil/plant/atmosphere continuum. **Plant Soil** 461:29–42. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04641-x>

Petrović M (2021) Selenium: widespread yet scarce, essential yet toxic. **ChemTexts** 7:1–17. <https://doi.org/10.1007/s40828-021-00137-y>

Pilon-Smits EAH (2019) On the ecology of selenium accumulation in plants. **Plants** 8. <https://doi.org/10.3390/plants8070197>

Pinto Irish K, Harvey MA, Harris HH, Aarts MGM, Chan CX, Erskine PD, van der Ent A (2023) Micro-analytical and molecular approaches for understanding the distribution, biochemistry, and molecular biology of selenium in (hyperaccumulator) plants. **Planta** 257:1–17. <https://doi.org/10.1007/s00425-022-04017-8>

Pisarek P, Bueno M, Thiry Y, Nicolas M, Gallard H, Le Hécho I (2021) Selenium distribution in French forests: Influence of environmental conditions. **Science Total Environmental** 774:144962. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144962>

Poblaciones MJ, Rodrigo S, Santamaría O, Chen Y, McGrath SP (2014) Agronomic selenium biofortification in *Triticum durum* under Mediterranean conditions: From grain to cooked pasta. **Food Chemistry** 146:378–384. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.070>

Puccinelli M, Pezzarossa B, Rosellini I, Malorgio F (2020) Selenium enrichment enhances the quality and shelf life of basil leaves. **Plants** 9:1–14. <https://doi.org/10.3390/plants9060801>

Pyrzynska K, Sentkowska A (2021) Selenium in plant foods: speciation analysis, bioavailability, and factors affecting composition. **Critical Review Food Science Nutrition** 61:1340–1352. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1758027>

Qutab S, Iqbal M, Rasheed R, Ashraf MA, Hussain I, Akram NA (2017) Root zone selenium reduces cadmium toxicity by modulating tissue-specific growth and metabolism in maize (*Zea mays* L.). **Archives Agronomy Soil Science** 63:1900–1911. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1315766>

Rady MM, Desoky EM, Ahmed SM, Majrashi A, Ali EF, Arnaout SMAI, Selem E (2021) Foliar Nourishment with Nano-Selenium Dioxide Promotes Physiology, Biochemistry, Antioxidant Defenses, and Salt Tolerance in *Phaseolus vulgaris*. **Plants** 10:1–20

Rahman M, Rahman K, Sathi KS, Alam MM, Nahar K, Fujita M, Hasanuzzaman M (2021) Supplemental selenium and boron mitigate salt-induced oxidative damages in glycine max l. **Plants** 10:1–16. <https://doi.org/10.3390/plants10102224>

Ramasamy S, Ganesh Thiruvengadam Nandagopal J, Balasubramanian M, Girija S (2019) Effect of Abscisic acid and Selenium foliar sprays on drought mitigation

in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). **Materials Today Proceedings** 48:191–195. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.465>

Rasool A, Shah WH, Mushtaq NU, Saleem S, Hakeem KR, ul Rehman R (2022) Amelioration of salinity induced damage in plants by selenium application: A review. **South African Journal Botany** 147:98–105. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.12.029>

Razzaq A, Ali A, Safdar L Bin, Zafar MM, Rui Y, Shakeel A, Shaukat A, Ashraf M, Gong W, Yuan Y (2020) Salt stress induces physiochemical alterations in rice grain composition and quality. **Journal Food Science** 85:14–20. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14983>

Rehman H ur, Alharby HF, Bamagoos AA, Abdelhamid MT, Rady MM (2021) Sequenced application of glutathione as an antioxidant with an organic biostimulant improves physiological and metabolic adaptation to salinity in wheat. **Plant Physiology Biochem** 158:43–52. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.041>

Rivero RM, Mittler R, Blumwald E, Zandalinas SI (2022) Developing climate-resilient crops: improving plant tolerance to stress combination. **Plant Journal** 109:373–389. <https://doi.org/10.1111/tpj.15483>

Rizwan M, Ali S, Rehman MZ ur, Rinklebe J, Tsang DCW, Tack FMG, Abbasi GH, Hussain A, Igalavithana AD, Lee BC, Ok YS (2021) Effects of selenium on the uptake of toxic trace elements by crop plants: A review. **Critical Review Environmental Science Technology** 51:2531–2566. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1796566>

Ros GH, van Rotterdam AMD, Bussink DW, Bindraban PS (2016) Selenium fertilization strategies for bio-fortification of food: an agro-ecosystem approach. **Plant Soil** 404:99–112. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2830-4>

Ru C, Hu X, Chen D, Wang W, Zhen J (2023) Photosynthetic, antioxidant activities, and osmoregulatory responses in winter wheat differ during the stress and recovery periods under heat, drought, and combined stress. **Plant Science** 327:111557. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111557>

Sabatino L, La Bella S, Ntatsi G, Iapichino G, D'Anna F, De Pasquale C, Consentino BB, Roupheal Y (2021) Selenium biofortification and grafting modulate

plant performance and functional features of cherry tomato grown in a soilless system.

**Scientia Horticulture** 285:110095. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110095>

Sachdev S, Ansari SA, Ansari MI, Fujita M, Hasanuzzaman M (2021) Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms.

**Antioxidants** 10:1–37. <https://doi.org/10.3390/antiox10020277>

Saeedi M, Soltani F, Babalar M, Izadpanah F, Wiesner-Reinhold M, Baldermann S (2021) Selenium Fortification Alters the Growth, Antioxidant Characteristics and Secondary Metabolite Profiles of Cauliflower (*Brassica oleracea* var. botrytis) Cultivars in Hydroponic Culture. **Plants** 10:1537. <https://doi.org/10.3390/plants10081537>

Saleem MF, Kamal MA, Shahid M, Awais M, Saleem A, Raza MAS, Ma BL (2021) Studying the foliar selenium-modulated dynamics in phenology and quality of terminal heat-stressed cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in association with yield. **Plant Biosystem** 155:668–678. <https://doi.org/10.1080/11263504.2020.1779835>

Santorufu L, Memoli V, Panico SC, Esposito F, Vitale L, Di Natale G, Trifuoggi M, Barile R, De Marco A, Maisto G (2021) Impact of anthropic activities on soil quality under different land uses. **International Journal Environmental Research Public Health** 18. <https://doi.org/10.3390/ijerph18168423>

Sardari M, Rezayian M, Niknam V (2022) Comparative Study for the Effect of Selenium and Nano-Selenium on Wheat Plants Grown under Drought Stress. **Russian Journal Plant Physiology** 69. <https://doi.org/10.1134/S102144372206022X>

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

Selvi A, Devi K, Manimekalai R, Prathima PT (2020) Comparative analysis of drought-responsive transcriptomes of sugarcane genotypes with differential tolerance to drought. **3 Biotechnology** 10:1–14. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02226-0>

Semida WM, El-Mageed TAA, Abdelkhalik A, Hemida KA, Abdurrahman HA, Howladar SM, Leilah AAA, Rady MOA (2021) Selenium modulates antioxidant activity, osmoprotectants, and photosynthetic efficiency of onion under saline soil conditions.

**Agronomy** 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050855>

Shabala S, Pottosin I (2014) Regulation of potassium transport in plants under hostile conditions: Implications for abiotic and biotic stress tolerance. **Physiology Plant** 151:257–279. <https://doi.org/10.1111/ppl.12165>

Shalaby T, Bayoumi Y, Alshaal T, Elhawat N, Sztrik A, El-Ramady H (2017) Selenium fortification induces growth, antioxidant activity, yield and nutritional quality of lettuce in salt-affected soil using foliar and soil applications. **Plant Soil** 421:245–258. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3458-8>

Shalaby TA, Abd-Alkarim E, El-Aidy F, Hamed ES, Sharaf-Eldin M, Taha N, El-Ramady H, Bayoumi Y, dos Reis AR (2021) Nano-selenium, silicon and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> boost growth and productivity of cucumber under combined salinity and heat stress. **Ecotoxicology Environmental Safety** 212. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111962>

Sharifi P, Amirnia R, Torkian M, Bidabadi SS (2021) Protective Role of Exogenous Selenium on Salinity-Stressed *Stachys byzantine* Plants. **Journal Soil Science Plant Nutrition** 21:2660–2672. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00554-5>

Shekari L, Aroiee H, Mirshekari A, Nemati H (2019) Protective role of selenium on cucumber (*Cucumis sativus* L.) exposed to cadmium and lead stress during reproductive stage role of selenium on heavy metals stress. **Journal Plant Nutrition** 42:529–542. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1554075>

Shi C, Liu H (2021) How plants protect themselves from ultraviolet-B radiation stress. **Plant Physiology** 187:1096–1103. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab245>

Silva Junior EC, Wadt LHO, Silva KE, Lima RMB, Batista KD, Guedes MC, Carvalho GS, Carvalho TS, Reis AR, Lopes G, Guilherme LRG (2017) Natural variation of selenium in Brazil nuts and soils from the Amazon region. **Chemosphere** 188:650–658. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.158>

Silva VM, Boleta EHM, Martins JT, dos Santos FLM, da Rocha Silva AC, Alcock TD, Wilson L, de Sá ME, Young SD, Broadley MR, White PJ, dos Reis AR (2019) Agronomic biofortification of cowpea with selenium: effects of selenate and selenite applications on selenium and phytate concentrations in seeds. **Journal Science Food Agriculture** 99:5969–5983. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9872>

Silva VM, Nardeli AJ, Mendes NAC, Alcock TD, Rocha M de M, Putti FF, Wilson L, Young SD, Broadley MR, White PJ, Reis AR dos (2021) Application of sodium

selenate to cowpea (*Vigna unguiculata* L.) increases shoot and grain Se partitioning with strong genotypic interactions. **Journal Trace Element Medicine Biology** 67. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2021.126781>

Silva VM, Rimoldi Tavanti RF, Gratão PL, Alcock TD, Reis AR dos (2020) Selenate and selenite affect photosynthetic pigments and ROS scavenging through distinct mechanisms in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) walp) plants. **Ecotoxicology Environmental Safety** 201:110777. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110777>

Skrypnik L, Novikova A, Tokupova E (2019) Improvement of phenolic compounds, essential oil content and antioxidant properties of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) depending on type and concentration of selenium application. **Plants** 8:1–13. <https://doi.org/10.3390/plants8110458>

Somalraju A, McCallum JL, Main D, Peters RD, Fofana B (2022) Foliar selenium application reduces late blight severity and incidence in potato and acts as a pathogen growth inhibitor and elicitor of induced plant defence. **Canadian Journal Plant Pathology** 44:39–55. <https://doi.org/10.1080/07060661.2021.1954093>

Stangoulis JCR, Knez M (2022) Biofortification of major crop plants with iron and zinc - achievements and future directions. **Plant Soil** 474:57–76. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05330-7>

Subramanyam K, Laing G Du, Van Damme EJM (2019) Sodium selenate treatment using a combination of seed priming and foliar spray alleviates salinity stress in rice. **Frontiers Plant Science** 10:1–17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00116>

Tian M, Xu X, Liu Y, Xie L, Pan S (2016) Effect of Se treatment on glucosinolate metabolism and health-promoting compounds in the broccoli sprouts of three cultivars. **Food Chemistry** 190:374–380. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.098>

Trippe RC, Pilon-Smits EAH (2021) Selenium transport and metabolism in plants: Phytoremediation and biofortification implications. **Journal Hazard Materials** 404:124178. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124178>

Wang F, Song N (2021) Modeling of selenite toxicity to wheat root elongation using biotic ligand model: Considering the effects of pH and phosphate anion. **Environmental Pollution** 272:115935. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115935>

Wang K, Wang Y, Li K, Wan Y, Wang Q, Zhuang Z, Guo Y, Li H (2020) Uptake, translocation and biotransformation of selenium nanoparticles in rice seedlings (*Oryza*

sativa L.). **Journal Nanobiotechnology** 18:1–15. <https://doi.org/10.1186/s12951-020-00659-6>

Wei Y, Chang L, Liu G, Wang X, Yang Y, Hashimoto K (2022) Long-lasting beneficial effects of maternal intake of sulforaphane glucosinolate on gut microbiota in adult offspring. **Journal Nutrition Biochemistry** 109:109-128. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2022.109098>

Weng JK, Lynch JH, Matos JO, Dudareva N (2021) Adaptive mechanisms of plant specialized metabolism connecting chemistry to function. **Nature Chemical Biology** 17:1037–1045. <https://doi.org/10.1038/s41589-021-00822-6>

White PJ (2018) Selenium metabolism in plants. **Biochimica et Biophysica Acta** 1862:2333–2342. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2018.05.006>

Wu Z, Bañuelos GS, Lin ZQ, Liu Y, Yuan L, Yin X, Li M (2015) Biofortification and phytoremediation of selenium in China. **Frontiers Plant Science** 6:1–8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00136>

Xiang J, Rao S, Chen Q, Zhang W, Cheng S, Cong X, Zhang Y, Yang X, Xu F (2022) Research Progress on the Effects of Selenium on the Growth and Quality of Tea Plants. **Plants** 11:1–12. <https://doi.org/10.3390/plants11192491>

Xiang M, Li Y, Yang J, Lei K, Li Y, Li F, Zheng D, Fang X, Cao Y (2021) Heavy metal contamination risk assessment and correlation analysis of heavy metal contents in soil and crops. **Environmental Pollution** 278. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116911>

Xie M, Sun X, Li P, Shen X, Fang Y (2021) Selenium in cereals: Insight into species of the element from total amount. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety** 20:2914–2940. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12748>

Xu S, Zhao N, Qin D, Liu S, Jiang S, Xu L, Sun Z, Yan D, Hu A (2021) The synergistic effects of silicon and selenium on enhancing salt tolerance of maize plants. **Environmental Experimental Botany** 187:104482. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104482>

Yang D, Hu C, Wang X, Shi G, Li Y, Fei Y, Song Y, Zhao X (2021) Microbes: a potential tool for selenium biofortification. **Metallomics** 13. <https://doi.org/10.1093/mtomcs/mfab054>

Yang H, Yang X, Ning Z, Kwon SY, Li ML, Tack FMG, Kwon EE, Rinklebe J, Yin R (2022) The beneficial and hazardous effects of selenium on the health of the soil-plant-human system: An overview. **Journal Hazard Materials** 422. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126876>

Yang J, Yu F, Fu Z, Fu Y, Liu S, Chen M, Li Y, Sun Q, Chang H, Zhou W, Wang X, Zhang L (2019) Pathway and driving forces of selenite absorption in wheat leaf blades. **Plant, Soil Environmental** 65:609–614. <https://doi.org/10.17221/542/2019-PSE>

Yao X, Jianzhou C, Xueli H, Binbin L, Jingmin L, Zhaowei Y (2013) Effects of selenium on agronomical characters of winter wheat exposed to enhanced ultraviolet-B. **Ecotoxicology Environmental Safety** 92:320–326. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.03.024>

Yin J, Slater L, Gu L, Liao Z, Guo S, Gentine P (2022) Global Increases in Lethal Compound Heat Stress: Hydrological Drought Hazards Under Climate Change. **Geophysical Research Letters** 49:1–12. <https://doi.org/10.1029/2022GL100880>

Zakaria Z, Zulkafflee NS, Mohd Redzuan NA, Selamat J, Ismail MR, Praveena SM, Tóth G, Abdull Razis AF (2021) Understanding potential heavy metal contamination, absorption, translocation and accumulation in rice and human health risks. **Plants** 10. <https://doi.org/10.3390/plants10061070>

Zandalinas SI, Fritschi FB, Mittler R (2021) Global Warming, Climate Change, and Environmental Pollution: Recipe for a Multifactorial Stress Combination Disaster. **Trends Plant Science** 26:588–599. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.02.011>

Zedan A, Omar S (2019) Nano Selenium: Reduction of severe hazards of Atrazine and promotion of changes in growth and gene expression patterns on *Vicia faba* seedlings. **African Journal Biotechnology** 18:502–510. <https://doi.org/10.5897/ajb2019.16773>

Zhang F, Li X, Wu Q, Lu P, Kang Q, Zhao M, Wang A, Dong Q, Sun M, Yang Z, Gao Z (2022a) Selenium Application Enhances the Accumulation of Flavones and Anthocyanins in Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Grains. **Journal Agriculture Food Chemistry** 70:13431–13444. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c04868>

Zhang H, Hao X, Zhang J, Wang L, Wang Y, Li N, Guo L, Ren H, Zeng J (2022b) Genome-wide identification of SULTR genes in tea plant and analysis of their

expression in response to sulfur and selenium. **Protoplasma** 259:127–140. <https://doi.org/10.1007/s00709-021-01643-z>

Zhang M, Wilson L, Xing G, Jiang L, Tang S (2020) Optimizing root architecture and increasing transporter gene expression are strategies to promote selenium uptake by high-se accumulating rice cultivar. **Plant Soil** 447:319–332. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04383-5>

Zhao FJ, Tang Z, Song JJ, Huang XY, Wang P (2022) Toxic metals and metalloids: Uptake, transport, detoxification, phytoremediation, and crop improvement for safer food. **Molecular Plant** 15:27–44. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.09.016>

## **CAPÍTULO 2** - Efeitos benéficos e fitotóxicos do selênio na cana-de-açúcar: Caracterização dos sintomas, ajustes metabólicos e interações na nutrição da planta

**RESUMO** - O selênio (Se) é um elemento benéfico para as plantas por ser capaz de potencializar o sistema antioxidante, preservar o aparato fotossintético, aumentar biossíntese de carboidratos, produtividade e qualidade agrícola. Entretanto, as plantas têm uma faixa estreita de acúmulo de Se nos tecidos dentro dos quais a escassez de Se transita para toxicidade. A hipótese deste estudo é que o Se tem papel benéfico em cana-de-açúcar em doses baixas, enquanto que em doses altas o efeito do Se é prejudicial. Dessa forma, o objetivo do trabalho é caracterizar os efeitos benéficos e fitotóxicos da adubação foliar com selenato e selenito de sódio em cana-de-açúcar, utilizando quatro concentrações de Se (0, 20, 40, 80, 160 g ha<sup>-1</sup>) e duas fontes de Se (selenato e selenito de sódio). Os sintomas benéficos e fitotóxicos em cana-de-açúcar foram observados em doses menores utilizando o tratamento com selenito comparado ao tratamento com selenato. A dose benéfica de selenato é de 40 g ha<sup>-1</sup> e do selenito de 20 g ha<sup>-1</sup>. O efeito benéfico do Se está relacionado ao aumento da massa de raiz, número e massa de perfilhos. Além disso, o Se-benéfico melhorou a qualidade tecnológica com aumento da concentração de sacarose, pol e °Brix do caldo. A dose fitotóxica de selenato e do selenito de 160 g ha<sup>-1</sup>. A fitotoxicidade do Se foi caracterizada com redução do crescimento da raiz e parte aérea aliado a perdas na qualidade tecnológica do caldo. Além disso, a Se-fitotoxicidade promoveu acúmulo de osmólitos (aminoácidos e sacarose) via homeostase do metabolismo de carboidratos e degradação de proteínas visando minimizar o estresse oxidativo. Além disso, a fitotoxidez desencadeou na cana-de-açúcar o acúmulo de Ca, Mg, Zn, Fe, Mn e S como estratégia nutricional para acionar mecanismos enzimáticos e não enzimáticos para mitigar o estresse ocasionado pelo excesso de Se.

**Palavras-chave:** *Saccharum*; metabolismo antioxidante; nutrição vegetal, osmólitos

**CHAPTER 2** - Beneficial and phytotoxic effects of selenium on sugarcane: Characterization of symptoms, metabolic adjustments and interactions in plant nutrition

**ABSTRACT** - Selenium (Se) is a beneficial element for plants because it is able to enhance the antioxidant system, preserve the photosynthetic apparatus, increase carbohydrate biosynthesis, productivity and agricultural quality. However, plants have a narrow range of Se accumulation in tissues within which Se depletion transitions to toxicity. The hypothesis of this study is that Se plays a beneficial role in sugarcane at low doses, while at high doses the effect of Se is harmful. Thus, the objective of this work is to characterize the beneficial and phytotoxic effects of foliar fertilization with sodium selenate and selenite on sugarcane, using four concentrations of Se (0, 20, 40, 80, 160 g ha<sup>-1</sup>) and two sources of Se (sodium selenate and selenite). Beneficial and phytotoxic symptoms in sugarcane were observed at lower doses using selenite treatment compared to selenate treatment. The beneficial dose of selenate is 40 g ha<sup>-1</sup> and of selenite 20 g ha<sup>-1</sup>. The beneficial effect of Se is related to the increase in root mass, number and mass of tillers. In addition, Se-beneficial improved the technological quality with an increase in the concentration of sucrose, pol and °Brix of the broth. The phytotoxic dose of selenate and of selenite 160 g ha<sup>-1</sup>. Se phytotoxicity was characterized by reduced root and shoot growth combined with losses in the technological quality of the broth. Furthermore, Se-phytotoxicity promoted osmolyte accumulation (aminoacids and sucrose) via homeostasis of carbohydrate metabolism and protein degradation in order to minimize oxidative stress. In addition, phytotoxicity triggered the accumulation of Ca, Mg, Zn, Fe, Mn and S in sugarcane as a nutritional strategy to trigger enzymatic and non-enzymatic mechanisms to mitigate the stress caused by excess Se.

**Keywords:** *Saccharum*; antioxidant metabolism; plant nutrition, osmolytes

## 1 INTRODUÇÃO

O selênio (Se) está presente em várias frações orgânicas e inorgânicas no solo e exibe diferentes comportamentos em função das propriedades físico-químicas do solo. Na solução do solo, as principais espécies inorgânicas de Se são o selenito e o selenato. O selenato tende a ser a forma predominante em ambientes aeróbicos, neutros a alcalinos, enquanto o selenito se torna a espécie dominante com potencial redox intermediário, especialmente em solo com pH baixo (Kushwaha et al., 2022; Song et al., 2018).

Tanto o selenato quanto o selenito são altamente solúveis em água, mas o selenito pode ser fortemente adsorvido por fases sólidas do solo como óxidos de ferro e alumínio, resultando em menor solubilidade do selenito na solução do solo comparado ao selenato. A matéria orgânica também é uma parte importante da adsorção do selenito no solo. Por outro lado, o selenato é fracamente adsorvido na superfície dos componentes do solo (Li et al., 2017).

Na planta, o Se utilizado em baixas concentrações é considerado um elemento benéfico que tem papel demonstrado aliviando estresses, como salinidade, seca, flutuações de temperatura, presença de metais pesados e outros poluentes ambientais. O efeito antiestresse do Se está principalmente relacionado à atuação de selenoproteínas no estímulo da via da glutathione peroxidase, que também proporciona aumento da atividade de compostos enzimáticos (superóxido dismutase, catalase e ascorbato peroxidase) e não enzimáticos (ácido ascórbico, flavonoides e tocoferóis) detoxificando a planta contra espécies reativas de oxigênio (Lanza e Reis, 2021).

Outra função importante do Se em plantas é a regulação do complexo antena da fotossíntese, protegendo as clorofilas ao elevar a concentração de pigmentos acessórios, como clorofila b, auxiliando no processo de transporte de elétrons entre os fotossistemas e evitando a fotodegradação e fotoinibição. O Se atua aumentando a eficiência da taxa fotossintética líquida, troca gasosa, acúmulo de osmólitos e formação de metabólitos secundários durante os eventos da fotossíntese (Lanza e Reis, 2021; Silva et al., 2020). Além disso, Zhou et al. (2018) verificaram em plantas de *Cardamine hupingshanensis* que o tratamento com Se afetou significativamente o

metabolismo dos carboidratos, regulando positivamente a fosfoenolpiruvato carboxiquinase e a pequena cadeia de ribulose-bifosfato carboxilase nas raízes e beta-amilase e beta-glucosidase nas folhas. O Se também é frequentemente associado ao estímulo da enzima glutatona redutase que participa de uma das etapas do processo de assimilação de nitrogênio, pela redução da GSSG à GSH (Garcia-Márquez et al., 2020).

O Se impacta também na nutrição de plantas, pois existem relatos de relações sinérgicas e antagônicas do Se com nutrientes e metais pesados. Reis et al. (2018) demonstraram que no arroz, a concentração de Se no grão aumenta com doses altas de nitrogênio (N). Segundo Zhou et al. (2020) esse efeito ocorre pela alta demanda na assimilação de N pelas plantas que em condições normais é assimilado em cisteína, mas que em abundância de N é requerido também Se para assimilação de N na forma de selenocisteína. Por outro lado, o fósforo (P) e enxofre (S) apresentam interações de antagonismo com o Se, uma vez que tais nutrientes concorrem pelos mesmos transportadores que o selênio em razão da similaridade do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  com  $\text{SeO}_3^{2-}$  e do  $\text{SO}_4^{2-}$  com  $\text{SeO}_4^{2-}$  no sítio de ação dos transportadores de sulfato (SULTRs) e transportadores de fosfato (OsNIP2), respectivamente (Zhou et al., 2020).

Estudos recentes têm demonstrado que o Se é capaz de minimizar os impactos causados por metais pesados. O exemplo é o caso do arsênio (As) onde o Se compartilha o mesmo transportador, o qual promove interação competitiva entre eles que reduz o transporte de As para a parte aérea da planta (Guan et al., 2022; Pokhrel et al., 2020). Já o efeito tóxico do mercúrio (Hg) e cádmio (Cd) é mitigado pelo Se devido a formação de quelatos insolúveis Hg-Se e Cd-Se no solo, impedindo a absorção e translocação desses metais pesados para as partes comestíveis das plantas (Xu et al., 2019; Zhao et al., 2019). Além disso, o Se estimula o sistema antioxidante eliminando EROS causado pelo excesso de metais pesados e estimulo de compartimentalização desses metais no vacúolo das células de modo a indisponibilizar os elementos tóxicos para a parte aérea e comestíveis da planta (Jiang et al., 2021).

O selenato e selenito são as formas mais utilizadas na agricultura para fornecer Se para as plantas em função da abundância dessas formas no solo e da fácil absorção e assimilação pelas plantas (Yang et al., 2022). De modo geral, a aplicação

foliar se mostrou ser a via mais estudada para proporcionar efeito benéfico nas plantas por utilizar baixa dosagem de Se e pela facilidade de operacionalizar a fertilização com Se via folha (Kalaei et al., 2022). A absorção foliar tem diversas estruturas de porta de entrada para o Se, como a epiderme, tricomas, estômatos, estigmas e hidatódios, enquanto que via solo, diversos trabalhos têm apontado para o problema da fertilização com Se, mostrando que o Se não é absorvido de forma eficiente pelas raízes (Deng et al., 2019).

É importante ressaltar que existe uma faixa estreita de acúmulo de Se nos tecidos dentro dos quais a deficiência de Se transita para toxicidade em plantas em função da dose (Zhou et al., 2020). Além disso, o efeito das fontes utilizadas para a adubação foliar com Se é imprescindível para definir a adubação. Sabe-se que o selenito causa fitotoxicidade em doses menores do que o selanato. Isto ocorre porque selenito é rapidamente convertido em formas orgânicas como selenocisteína ou selenometionina, enquanto que o selenato tem maior translocação na planta (Wang et al., 2020). O Se-fitotóxico é variável quanto a dose para cada espécie de planta, porém em muitos estudos o aumento da biossíntese de osmólitos compatíveis, como a prolina, glicina betaina, sacarose e outros açúcares são estimulados em plantas submetidas a fitotoxicidade (Ul Hassan et al., 2019; Mostofa et al., 2020). Os osmólitos têm papel de regular o potencial osmótico celular e a atividade funcional das membranas celulares (Anjum et al., 2017).

Diversos trabalhos têm apontado efeitos benéficos do Se em plantas cultivadas, como o tomate (Morales-Espinoza et al., 2019; Rady et al., 2020), trigo (Elkelish et al., 2019), milho (Jiang et al., 2017), arroz (Andrade et al., 2018), pepino (Jozwiak e Politycka, 2019) e algodão (Saleem et al., 2021), porém estudos do uso de Se em cana-de-açúcar ainda carece de mais informações.

A hipótese deste estudo é que o Se tem papel benéfico na cana-de-açúcar estimulando o metabolismo primário, produtividade e qualidade tecnológicas em doses baixas, enquanto que em doses altas o efeito do Se é prejudicial ocorrendo sintomas de fitotoxicidade. Dessa forma, o objetivo do trabalho é caracterizar os mecanismos responsáveis pelos efeitos benéficos e fitotóxicos da adubação foliar com selenato e selenito de sódio em cana-de-açúcar.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Condições de crescimento e design experimental

Para testar nossa hipótese, um experimento de vaso foi conduzido no município de Suzanápolis, Estado de São Paulo, Brasil, com as seguintes coordenadas geográficas, latitude 20°23'21.49"S e longitude 51° 1'56.21"W, e 380 m de altitude. O clima predominante da região é o Aw (Köppen), clima seco definido, temperatura média anual de 21,6 °C, umidade relativa média de 70%, e média de chuva de 1244 mm. O experimento não teve controle de umidade do ar, luminosidade e temperatura. Durante a condução do experimento foram coletados os dados climáticos da Estação local e da estação agrometeorológica da Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Ilha Solteira - SP (Figura 1). Dessa forma, foi utilizado a evapotranspiração de referência e coeficiente da cultura ( $K_c$ ) de cada estágio fenológico para calibrar turno de rega e a lâmina a ser aplicada de acordo com Marin et al. (2020).

O experimento foi delineado em blocos completos casualizados distribuídos em esquema fatorial  $2 \times 5$ , onde: cinco concentrações de Se (0, 20, 40, 80 e 160 g ha<sup>-1</sup>) e duas formulações de Se (selenato de sódio e selenito de sódio) foram aplicados via foliar no cultivo de cana-de-açúcar.

Em fevereiro de 2020, o solo foi coletado de uma área já corrigida com calcário (1 t ha<sup>-1</sup>), gesso (0,5 t ha<sup>-1</sup>) e fosfato natural (0,54 t ha<sup>-1</sup>) de acordo com Raij et al. (2001). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico e as propriedades químicas foram: selênio: indetectável; pH (CaCl<sub>2</sub> 0,01 M) 5,3; fósforo (resina): 7 mg dm<sup>-3</sup>, enxofre: 4 mg dm<sup>-3</sup> (fosfato de cálcio), boro (água quente): 0,13 mg dm<sup>-3</sup>, cobre (ácido dietileno triamina pentacético - DTPA): 0,8 mg dm<sup>-3</sup>, ferro (DTPA): 21 mg dm<sup>-3</sup>, manganês (DTPA): 22,1 mg dm<sup>-3</sup>, zinco (DTPA): 1,0 mg dm<sup>-3</sup>; potássio (resina): 4,5 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, cálcio (resina): 17 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, magnésio (resina): 7,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, H+Al (tampão SMP): 14 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, capacidade de troca catiônica : 42,3 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e saturação de base: 28,5% (Raij et al., 2001).

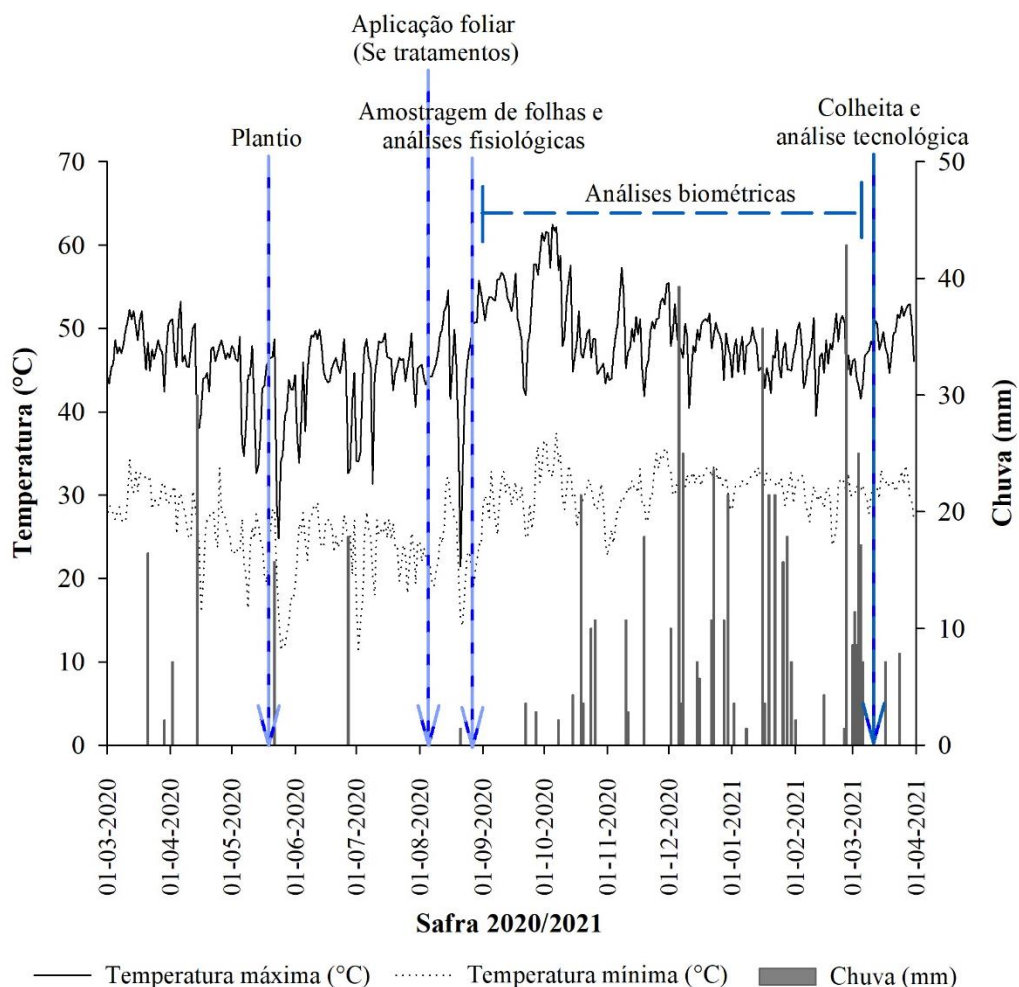


Figura 1 – Dados climáticos durante a condução do experimento.

As mudas pré-brotadas da variedade RB966928 (Ridesa-Brasil: <https://www.ridesa.com.br/variedades>) foram transplantadas no dia 18 de maio de 2020 para vasos de polietileno com volume de 18 L, contendo solo peneirado com malha de 4 mm. A adubação com NPK de plantio foi realizada com 2,5 g vaso<sup>-1</sup> da formulação 06-30-24 de acordo com Raij et al. (2001). Aos 2 meses após o transplântio (MAT) foi realizada uma aplicação foliar com 0,42 mg de B vaso<sup>-1</sup>. Aos 3 MAT foi realizada a aplicação foliar dos tratamentos contendo Se. Aos 4 MAT foi realizada adubação de cobertura com 1,25 g vaso<sup>-1</sup> do formulado 20-00-20 de acordo com Raij et al. (2001). Aos 5 MAT foi realizada aplicação foliar com 0,83 mg de B vaso<sup>-1</sup>, e aos 6 MAT foi realizada aplicação foliar com 1,25 mg de B vaso<sup>-1</sup>, usando a fonte ácido bórico. Não houve necessidade de realizar controle de pragas e doenças.

## 2.2 Análise química foliar

O tecido vegetal de 10folhas +3 (folha diagnose) foi coletado aos 14 dias após a aplicação dos tratamentos, retirando-se as nervuras centrais, identificadas e acondicionadas em sacos plásticos (Gallo et al., 1962). O tecido vegetal foi utilizado para determinar as concentrações de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e Se após digestão com ácido nítrico PA (Merch) e posterior análise por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS).

O material vegetal foi seco em estufa a  $45 \pm 5$  °C por 72 h até atingir peso constante e moído em moinho de facas de aço inoxidável Willey. Uma amostra de 0,20 g de peso seco foi colocada em recipientes de digestão com perfluoroalcoxis (PFA) com adição de 6 mL de HNO<sub>3</sub> PA 65% (Merch). A digestão foi realizada em um sistema de micro-ondas composto por uma plataforma Multiwave GO com rotor de 12 vasos (Anton Paar, Graz, Áustria).

As configurações de digestão foram definidas como: temp = 195 °C, tempo = 45 min de rampa e 20 min de espera, dois recipientes contendo apenas ácido nítrico e duas réplicas de material de referência certificado (CRM) para Se foram adicionados a cada três corridas. O CRM utilizado foi o BCR 402 (trevo branco) com recuperação de Se de 97%. Após a digestão, 9 mL de água mili-Q foram adicionados a cada tubo para perfazer um volume final de 15 mL e armazenados à temperatura ambiente. Os digeridos foram diluídos para 1:5 adicionando água mili-Q antes da análise elementar. Os elementos foram analisados por ICP-MS (Agilent 7500ce, Agilent Technologies®, Tóquio-Japão) conforme descrito anteriormente por Silva et al. (2018).

## 2.3 Crescimento de plantas e análise de rendimento

A altura de plantas foi medida aos 214 dias após a aplicação (DAA) da base da planta até a última inserção foliar apical do perfilho dominante, expressa em centímetros. Aos 214 DAA foi realizado a colheita para mensurar o número de perfilhos por vaso.

Posteriormente, a massa perfilhos produzidos por vaso foi pesada com auxílio de balança analítica e expressa em quilogramas. A seguir, foi separado a massa fresca da parte aérea (folhas+perfilhos) da raiz, onde após a limpeza das amostras elas foram levadas à estufa de ventilação forçada a 65°C por 72 h até a atingir massa constante. A massa seca da parte aérea e da raiz foi pesada com a balança analítica e expressa em quilogramas.

Aos 214 DAA foi realizado coleta, limpeza e fotografias para diagnóstico do crescimento e do sistema radicular.

## 2.5 Análise de açúcares na folha

Para analisar a sacarose e os açúcares totais, amostras de folhas foram extraídas de acordo com Bieleski e Turner (1966). Para extração, 0,125 g de material vegetal foi triturado em almofariz de porcelana e misturado com 1,25 mL de solução de MCW (60% metanol, 25% clorofórmio e 15% água) e mantido em geladeira por 24 horas a 4 °C. O material foi agitado em vórtex e centrifugado a 10.000 rpm por 10 minutos a 4 °C. Em outro tubo, 1,0 mL do sobrenadante do extrato MCW foi transferido e misturado com 125 µL de clorofórmio e 187 µL de água deionizada. Após a separação de fases, a concentração de açúcares totais, sacarose, nitrato, amônia e aminoácidos foi determinada usando a fase solúvel em água.

Para quantificar os açúcares totais, 10 µL de sobrenadante foram misturados com 250 µL de fenol a 5% ( $m v^{-1}$ ) e 1 mL de ácido sulfúrico concentrado (DuBois et al., 1956). A mistura foi agitada em vórtex e após resfriamento à temperatura ambiente, a absorbância das amostras foi lida em  $\lambda = 490$  nm. Os resultados foram expressos em  $mg g^{-1}$  massa fresca.

Para quantificar a sacarose, 10 µL de sobrenadante foram misturados com 250 µL de KOH a 30% ( $m v^{-1}$ ) e 1 mL de ácido sulfúrico concentrado (Van Handel, 1967). A mistura foi agitada em vórtex e aquecida em estufa a 100 °C por 10 minutos. Após resfriamento até a temperatura ambiente, a absorbância foi lida em  $\lambda = 490$  nm usando um espectrofotômetro. Ambas as quantificações foram realizadas usando uma curva de sacarose padrão. Os resultados para açúcares totais e sacarose foram expressos em  $mg g^{-1}$  de massa fresca.

## 2.6 Análise de compostos nitrogenados

A concentração de amônia foi medida de acordo com McCullough (1967). Para a determinação da amônia, 20  $\mu\text{L}$  do sobrenadante foram misturados a 500  $\mu\text{L}$  de solução de fenol (2,5 g de fenol + 12,5 mg de nitroprussiato de sódio em um volume final de 250 mL de  $\text{H}_2\text{O}$  deionizada) e 500  $\mu\text{L}$  de solução de fosfato. A mistura foi homogeneizada por vórtex e então incubada em estufa por 1 hora a  $37^\circ\text{C}$ . Após resfriamento até a temperatura ambiente, as leituras do espectrofotômetro foram feitas em  $\lambda = 630 \text{ nm}$ . A concentração de amônia foi determinada usando a curva padrão da solução de sulfato de amônio. Os resultados foram expressos em  $\mu\text{mol g}^{-1}$  massa fresca.

A concentração total de aminoácidos livres foi medida de acordo com Yemm e Cocking (1955). Do extrato solúvel em água MCW, uma alíquota de 60  $\mu\text{L}$  foi removida e misturada com 100  $\mu\text{L}$  de citrato de sódio 0,2 M, 40  $\mu\text{L}$  de 5% ( $\text{m v}^{-1}$ ) de ninidrina em éter monometílico de etilenoglicol e 200  $\mu\text{L}$  de KCN 0,2 mM. A solução foi misturada e incubada aquecida a  $100^\circ\text{C}$  por 15 min e depois resfriada por 10 min em água. Em seguida, 200  $\mu\text{L}$  de álcool etílico 60% ( $\text{v v}^{-1}$ ) foram adicionados para parar a reação e lidos em  $\lambda = 570 \text{ nm}$  registrados usando um espectrofotômetro em  $\lambda = 570 \text{ nm}$ . Os aminoácidos solúveis totais foram calculados com base em uma curva de calibração padrão de metionina de metionina. Os resultados foram expressos em  $\mu\text{mol g}^{-1}$  massa fresca.

## 2.7 Análises do estresse oxidativo

A concentração de peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) foi determinada de acordo com Alexieva et al. (2001). Aproximadamente 200 mg de material vegetal congelado foram pesados e triturados em almofariz de porcelana com nitrogênio líquido. Ao material vegetal macerado triturado foi adicionado misturado a 2 mL de ácido tricloroacético (TCA) 0,1% ( $\text{m v}^{-1}$ ) e mantido em tubo Eppendorf. O material foi homogeneizado por vórtex e centrifugado a 10.000 rpm por 15 minutos a  $4^\circ\text{C}$ . Em seguida, 200  $\mu\text{L}$  do sobrenadante foram coletados e misturados com 200  $\mu\text{L}$  de

tampão fosfato de potássio 100 mM pH 7,5 (100 mM) e 800  $\mu$ L de iodeto de potássio (1 M). As amostras foram colocadas no gelo por 1 h. Após o aquecimento até a temperatura ambiente, as leituras de absorvância foram feitas em  $\lambda = 390$  nm em um espectrofotômetro. A concentração foliar de  $H_2O_2$  foi calculada com base em uma curva padrão e os resultados expressos em  $\mu$ mol  $g^{-1}$  massa fresca.

A peroxidação lipídica foi medida de acordo com Heath e Packer (1968). Amostras de folhas (0,2 g) foram trituradas em almofariz de porcelana com nitrogênio líquido. O material triturado foi misturado com 2 mL de ácido tricloroacético (TCA) a 0,1% ( $m v^{-1}$ ) + polivinilpirrolidona (PVPP) a 20% ( $m v^{-1}$ ). O material foi homogeneizado por vórtex e centrifugado a 10.000 rpm por 15 minutos a 4 °C. A reação foi realizada misturando 250  $\mu$ L de sobrenadante com 1 mL de solução de ácido tricloroacético 20% ( $m v^{-1}$ ) + ácido tiobarbitúrico 0,5% ( $m v^{-1}$ ). As amostras foram mantidas em banho seco a 95 °C por 30 minutos, depois transferidas para uma caixa contendo gelo por 10 minutos. Em seguida, o material foi novamente centrifugado a 10.000 rpm por 10 min. As leituras da amostra foram feitas em  $\lambda = 535$  e 600 nm. As leituras da amostra foram feitas em  $\lambda = 535$  e 600 nm, respectivamente. Os resultados foram expressos em nmol MDA  $g^{-1}$  massa fresca.

## 2.8 Análise tecnológica

Aos 214 DAA, época de colheita, 10 perfilhos foram coletados para análise tecnológica por meio da avaliação dos teores de sacarose (Pol% cana), pureza, concentração de sólidos solúveis (Brix) e açúcares redutores determinados de acordo com os métodos descritos por Consecana (2006).

## 2.8 Análise estatística

Os dados foram submetidos à ANOVA e, em seguida, analisados estatisticamente significantes ao nível de 5% de probabilidade de erro. Os pressupostos do modelo foram avaliados pelo teste de Shapiro-Wilk e a homocedasticidade de variância pelo teste de Hartley. Quanto aos efeitos de doses de Se foram avaliados pelo teste de regressão a 5% significância. O efeito da fonte

de Se e as interações entre as formulações e as doses de Se, quando significativas, foram analisadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. A análise multivariada foi realizada por meio da Análise de Componentes Principais. Todas as análises foram realizadas por meio do software estatístico R (R Development Core Team, v. 3.3.0+).

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1 Concentração de Na e Se no tecido foliar**

Observou-se que a fonte selenito de sódio proporcionou aumento mais acentuado na concentração de sódio no tecido foliar do que utilizando a fonte selenato de sódio (Figura 2A). O efeito do selenito de sódio se ajustou a uma equação quadrática ( $y = -0,001x^2 + 0,2758x + 0,6308$ ;  $R^2 = 89$ ) com pico na concentração de sódio no tecido foliar utilizando a dose de  $138 \text{ g ha}^{-1}$ , enquanto que para o selenato de sódio, o pico de concentração de sódio no tecido foliar ocorreu utilizando a dose de  $115 \text{ g ha}^{-1}$  ( $y = -0,0029x^2 + 0,6693x + 6,2872$ ;  $R^2 = 0,92$ ).

A concentração de Se no tecido foliar foi mais progressivo utilizando a fonte selenito de sódio do que selenato de sódio (Figura 2D, F), sendo que esse efeito para o selenato de sódio se ajustou a uma equação linear progressiva conforme aumento da dose de Se, enquanto que o selenito de sódio se ajustou a uma equação quadrática ( $y = -0,0017x^2 + 0,4430x - 0,1282$ ;  $R^2 = 0,95$ ) com pico de concentração de Se no tecido foliar utilizado a dose de  $130 \text{ g ha}^{-1}$ .

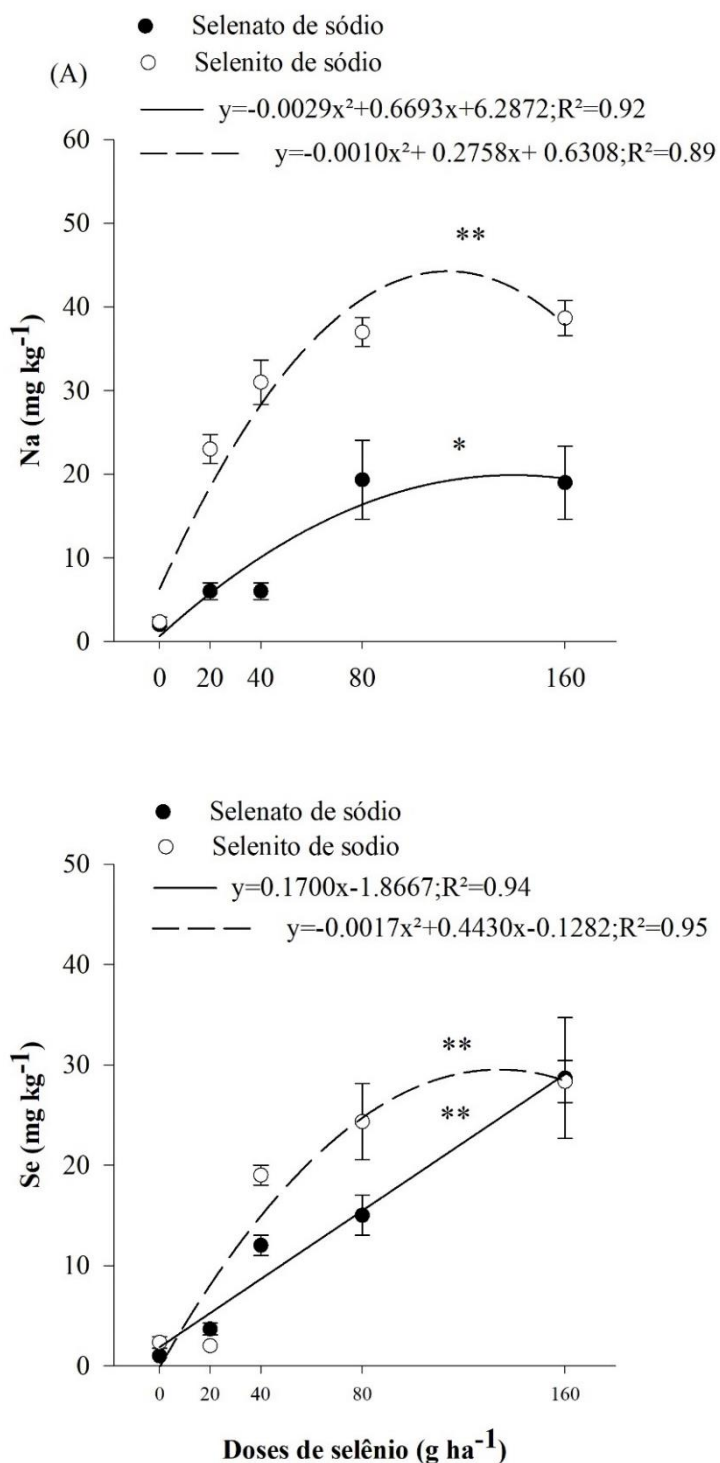


Figura 2 - Concentração de sódio e função da Se-fontes (A) Se-doses (B) e interação entre Se-fonte e Se-dose (C) em folhas de cana-de-açúcar. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as fontes de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as doses de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 5$  repetições).

### 3.2 Efeito do Se sobre os nutrientes

Os nutrientes N, P e K não sofreram alterações em função dos tratamentos com Se (Figura 3A, B e C). Por outro lado, doses a partir de 40 g ha<sup>-1</sup> aumentou a concentração de Ca, Mg e S no tecido foliar para ambas as fontes de Se utilizadas (Figura 3D, E e F).

Quanto aos micronutrientes B e Cu não foram alterados em função dos tratamentos utilizados (Figura 4A e B). O selenato de sódio aumentou a concentração de Zn no tecido foliar a partir da dose de 80 g ha<sup>-1</sup> e resultou em incremento na concentração desse micronutriente quando comparado à fonte selenito de sódio (Figura 4C). A concentração de Mn e Fe no tecido foliar cresceu progressivamente quando aplicado a fonte selenato de sódio, enquanto que utilizando o selenito não houve alteração na concentração desses micronutrientes (Figura 4D).

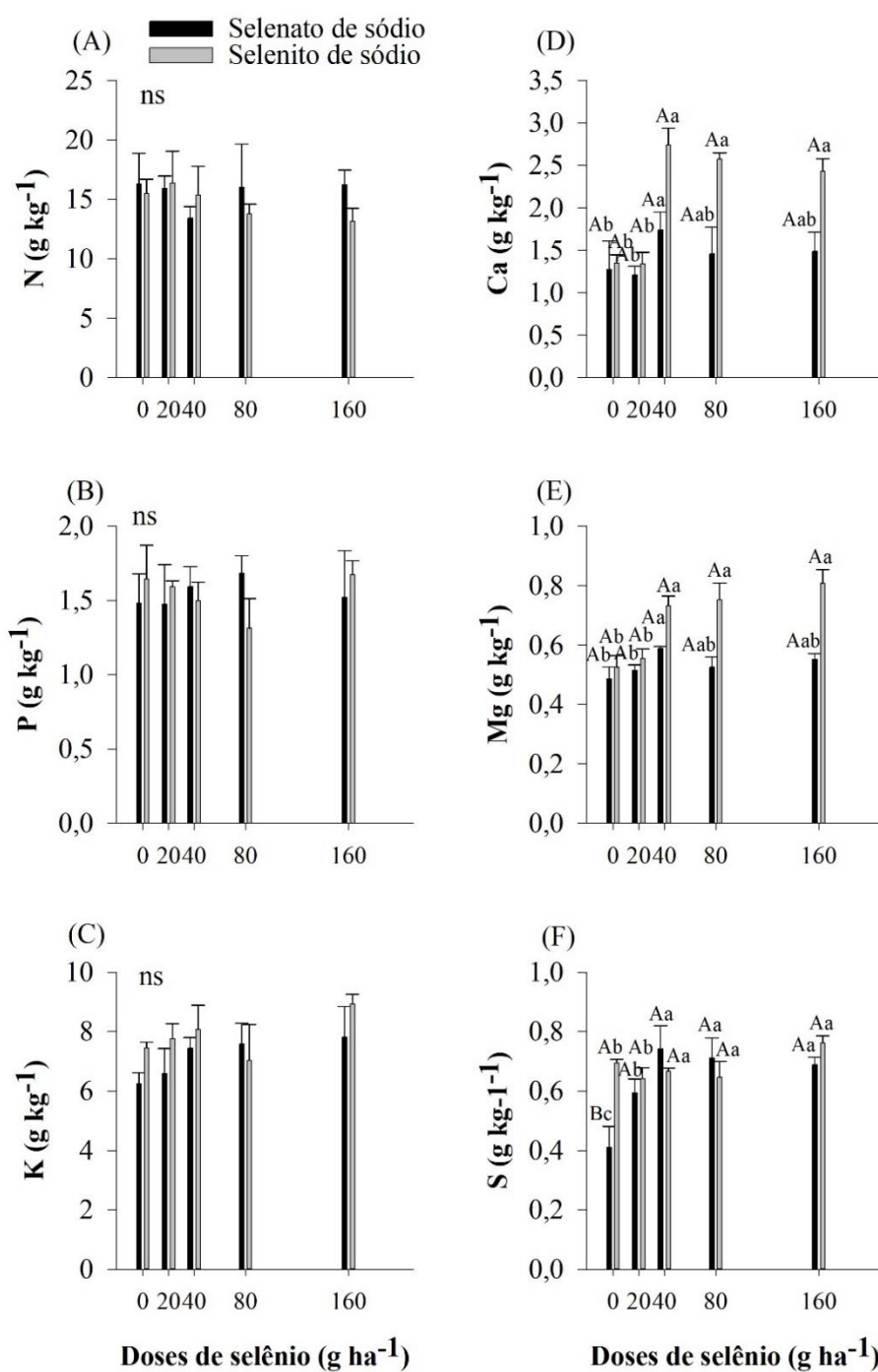


Figura 3 - Concentração de macronutrientes em folhas de cana-de-açúcar em resposta à diferentes doses de selenato e selenito de sodio. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as fontes de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as doses de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média (n = 5 repetições).

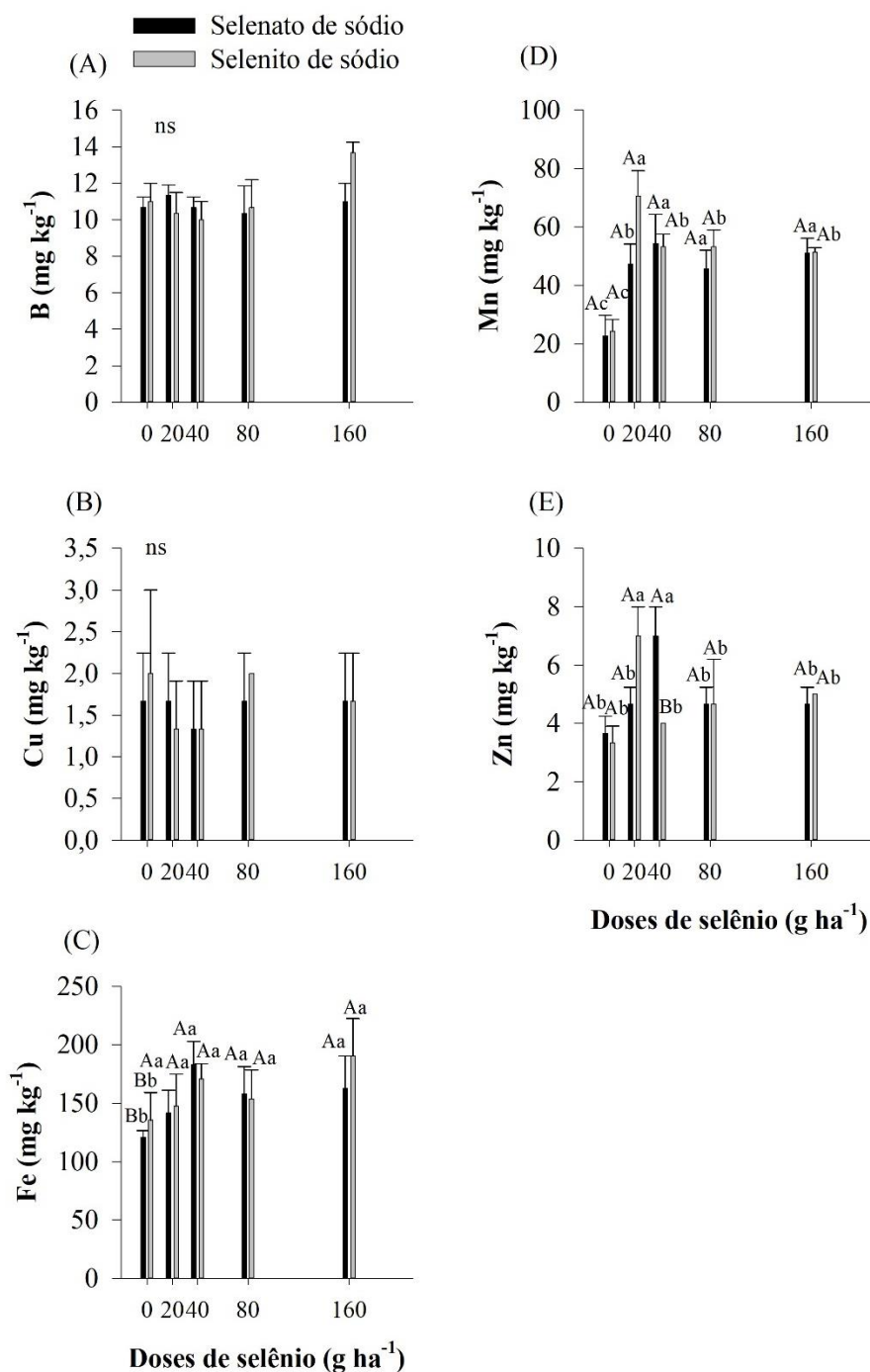


Figura 4 - Concentração de micronutrientes em folhas de cana-de-açúcar em resposta à diferentes doses de selenato e selenito de sódio. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as fontes de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as doses de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 5$  repetições).

### 3.3 Crescimento vegetal

Não houve resposta dos tratamentos com Se sobre a altura e diâmetro das plantas. Já a fonte selenito de sódio reduziu a massa seca da parte aérea nas doses de 80 e 160 g ha<sup>-1</sup>, enquanto que o selenato de sódio reduziu a massa da parte aérea apenas na dose de 160 g ha<sup>-1</sup> (Tabela 1).

Na Tabela 1, observou-se que houve aumento no número de perfilhos utilizando a dose de 40 g ha<sup>-1</sup> de selenato e 20 g ha<sup>-1</sup> de selenito. Por outro lado, a partir da dose de 160 g ha<sup>-1</sup> de selenato e 80 g ha<sup>-1</sup> de selenito houve redução no número de perfilhos por planta.

Tabela 1. Média + erro padrão da altura, diâmetro, massa seca da parte aérea, massa seca da raiz, número de perfilhos por planta e massa de perfilhos da cana-de-açúcar.

Doses de selênio (g ha <sup>-1</sup> )	Fonte de selênio	Altura de planta (m)	Diâmetro (cm)	Massa seca da parte aérea (kg)	Massa seca da raiz (kg)	Número de perfilhos por planta	Massa de perfilhos (kg)
0	Selenato	1,1 ± 0,1 Aa	1,7 ± 0,2 Aa	1,4 ± 0,3 Aa	0,3 ± 0,1 Ab	7,3 ± 0,4 Ab	0,9 ± 0,3 Ab
	Selenito	1,2 ± 0,1 Aa	1,8 ± 0,1 Aa	1,4 ± 0,3 Aa	0,4 ± 0,1 Aab	7,0 ± 1,5 Ab	0,8 ± 0,2 Ab
20	Selenato	1,1 ± 0,1 Aa	1,9 ± 0,2 Aa	1,5 ± 0,3 Aa	0,3 ± 0,1 Ab	8,0 ± 0,7 Aab	1,1 ± 0,2 Aa
	Selenito	1,2 ± 0,1 Aa	1,7 ± 0,1 Aa	1,6 ± 0,4 Aa	0,4 ± 0,1 Aab	7,8 ± 0,7 Aa	1,4 ± 0,3 Aa
40	Selenato	1,1 ± 0,1 Aa	1,9 ± 0,3 Aa	1,5 ± 0,2 Aa	0,5 ± 0,1 Aa	8,3 ± 0,7 Aa	1,2 ± 0,1 Aa
	Selenito	1,3 ± 0,2 Aa	1,7 ± 0,1 Aa	1,5 ± 0,2 Aa	0,5 ± 0,1 Aa	7,5 ± 0,8 Aa	1,2 ± 0,2 Aa
80	Selenato	1,2 ± 0,2 Aa	1,6 ± 0,1 Aa	1,6 ± 0,2 Aa	0,6 ± 0,1 Aa	7,5 ± 0,5 Aab	1,2 ± 0,2 Aa
	Selenito	1,1 ± 0,1 Aa	1,7 ± 0,1 Aa	1,3 ± 0,2 Bb	0,3 ± 0,1 Ab	7,0 ± 0,9 Ab	0,8 ± 0,2 Bb
160	Selenato	1,2 ± 0,1 Aa	1,8 ± 0,2 Aa	1,3 ± 0,3 Ab	0,3 ± 0,1 Ab	7,3 ± 0,4 Ab	1,0 ± 0,3 Aa
	Selenito	1,2 ± 0,1 Aa	1,7 ± 0,1 Aa	1,3 ± 0,3 Ab	0,3 ± 0,1 Ab	6,5 ± 0,5 Ab	0,9 ± 0,2 Ab

Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre fontes de Se, e letras menores indicam diferença entre taxas de Se de acordo com o teste de Tukey (p≤0,05).

A massa seca da raiz teve melhor resposta utilizando a dose até 80 g ha<sup>-1</sup> usando selenato de sódio. Já para o selenito de sódio houve melhor resposta a dose até 40 g ha<sup>-1</sup> (Tabela 1). O efeito de selenato e selenito de sódio no sintoma visual da raiz pode ser observado na Figura 5 onde se mostra variações sutis de volume, . Observa-se que a dose de 80 g ha<sup>-1</sup> de selenato e selenito proporcionaram raízes mais volumosas, longas, finas e mais claras (Figura 5D e 5I), enquanto que a dose de 160 g ha<sup>-1</sup> para ambas as Se-fontes as raízes estão menores e com coloração mais escura (Figura 5E e 4J).

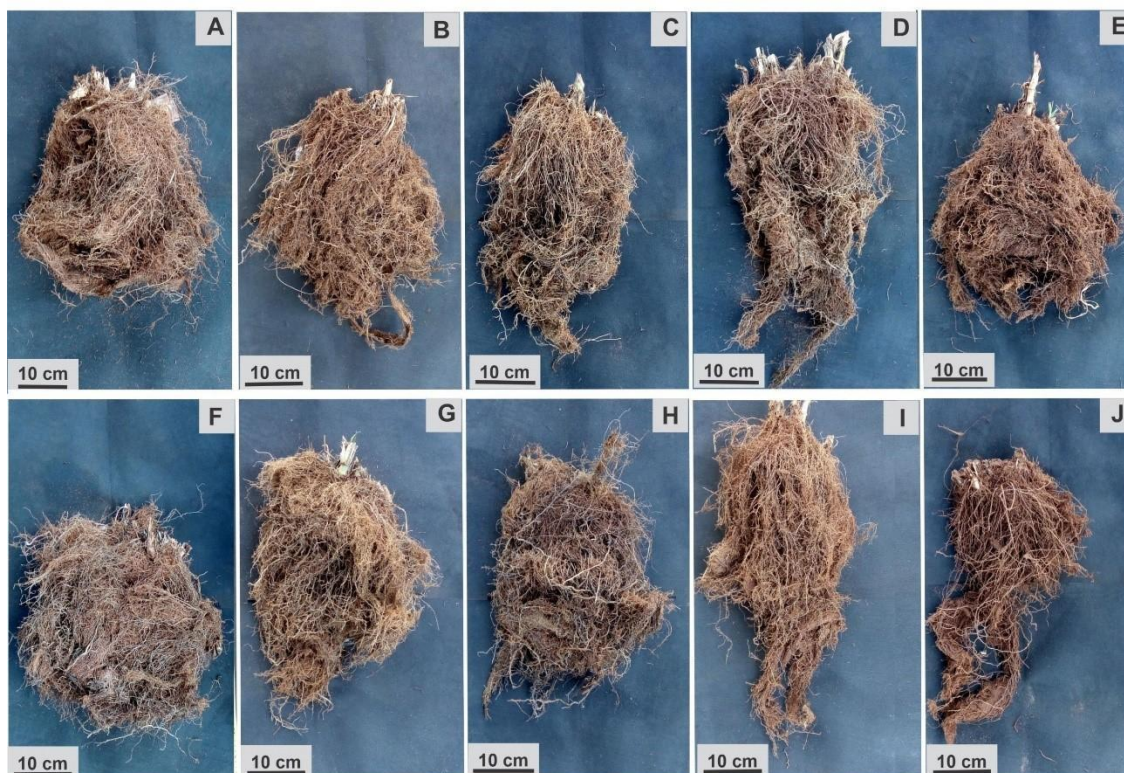


Figura 5 - Aspecto visual da raiz de cana-de-açúcar em resposta a 0; 20; 40; 80 e 160 g ha<sup>-1</sup> (A, B, C, E e E, respectivamente) na fonte selenato de sódio e, 0; 20; 40; 80 e 160 g ha<sup>-1</sup> (F, G, H, I e J, respectivamente) na fonte selenito de sódio.

### 3.3 Análises bioquímicas

Na figura 6A mostra que a concentração de açúcares solúveis na folha aumentou progressivamente para ambas as fontes de Se até a dosagem de 80 g ha<sup>-1</sup>. Já a concentração de sacarose na folha foi aumentada utilizando o selenito de sódio a partir da dose de 20 g ha<sup>-1</sup> (Figura 6B). Destaca-se que o selenito de sódio ocasionou redução abrupta de açúcar solúvel ao passo que aumentou drasticamente a concentração de sacarose na folha utilizando a dose de 160 g ha<sup>-1</sup> (Figura 6A, B).

A concentração de aminoácidos foi progressivamente aumentada utilizando o selenato de sódio conforme aumento da dose. Por outro lado, não foi observado efeito na concentração de aminoácidos conforme aumento na dose de selenito de sódio. Na dose de 80 g ha<sup>-1</sup>, observa-se que o selenato de sódio ocasionou aumento na concentração de aminoácidos comparado à fonte selenito de sódio (Figura 6C).

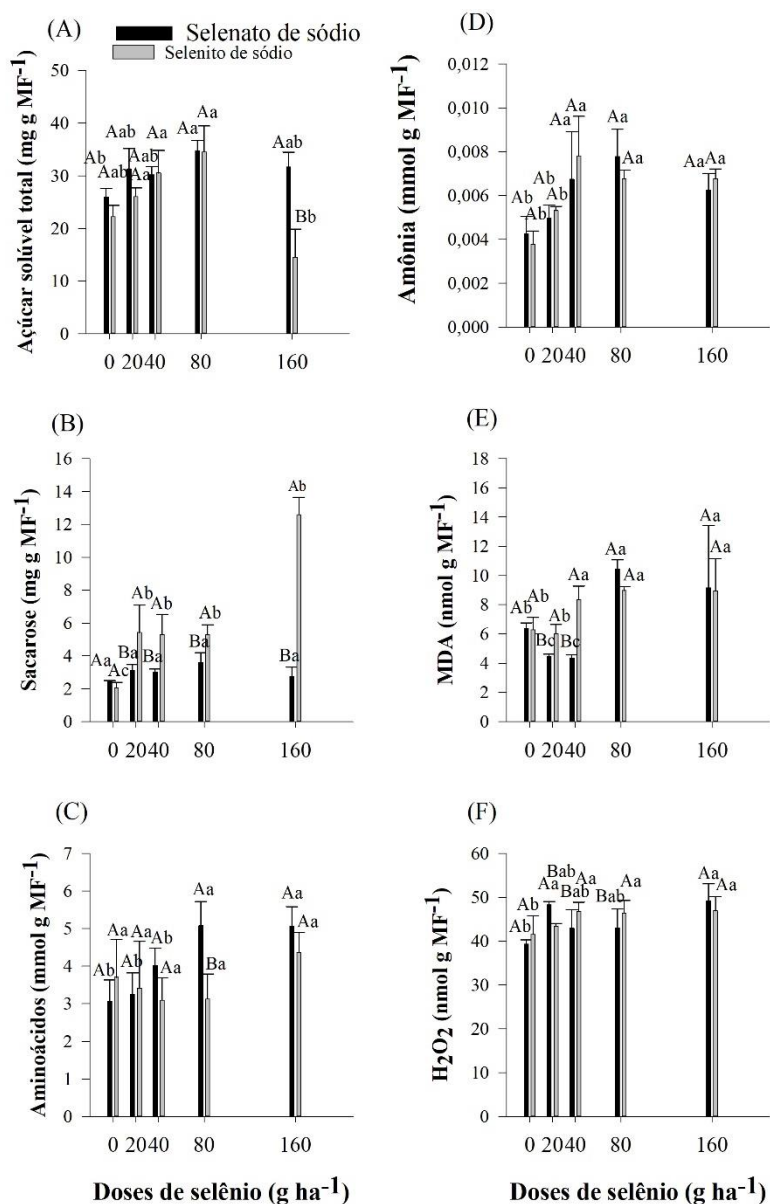


Figura 6 - Concentração de açúcar solúvel total (A), sacarose (B), aminoácidos (C), amônia (D), malondialdeído (E) e peróxido de hidrogênio (F) em folha de cana-de-açúcar em resposta a diferentes doses de selenato e selenito de sódio. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as fontes de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as doses de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 5$  repetições).

O selenato e selenito de sódio resultaram em aumento similar na concentração de amônia a partir da dose de 40 g ha<sup>-1</sup> (Figura 6D).

O selenato de sódio promoveu redução na concentração de malondialdeído (MDA) nas doses de 20 e 40 g ha<sup>-1</sup>, sendo que a partir da dose de 80 g ha<sup>-1</sup> houve

aumento da concentração de MDA no tecido foliar. Já o selenito de sódio ocasionou aumento de MDA a partir da dose de 40 g ha<sup>-1</sup> (Figura 6E).

Na Figura 6F mostra que a partir da dose de 20 g ha<sup>-1</sup> houve aumento de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) em ambas as fontes de Se. Observa-se na dose de 20 g ha<sup>-1</sup> que a fonte selenato de sódio resultou em maior concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> comparado ao selenito de sódio. Por outro lado, as doses de 40 e 80 g ha<sup>-1</sup> o selenito de sódio acarretou em maior concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no tecido foliar comparado ao selanato de sódio (Figura 6F).

### 3.3 Qualidade tecnológica

A sacarose, Pol e °Brix presentes no caldo da cana-de-açúcar utilizando o tratamento com selenato de sódio teve seu pico na dose de 40 g ha<sup>-1</sup>, enquanto que o selenito de sódio resultou no pico de aumento de sacarose utilizando a dose de 80 g ha<sup>-1</sup>. Para ambas as fontes de Se a dose de 160 g ha<sup>-1</sup> reduziu a porcentagem de sacarose, Pol e °Brix no caldo. Já a porcentagem de açúcares redutores no caldo não foi influenciada pelos tratamentos estudados (Tabela 2).

Tabela 2. Média + erro padrão de sacarose, açúcar redutor, pol e °Brix no caldo de cana-de-açúcar.

Doses selênio (g ha <sup>-1</sup> )	Fontes de selênio	Sacarose	Açúcar redutor	Pol	°Brix
		(%)	(%)	(%)	
0	Selenato	52,5 ± 3,4 Ab	0,9 ± 0,1 Aa	12,9 ± 0,8 Ab	12,6 ± 0,5 Ab
	Selenito	52,2 ± 1,2 Aa	0,8 ± 0,1 Aa	14,3 ± 0,3 Aa	13,7 ± 0,2 Aa
20	Selenato	53,4 ± 4,9 Ab	0,9 ± 0,1 Aa	13,1 ± 1,1 Ab	12,8 ± 0,8 Ab
	Selenito	59,5 ± 4,5 Aa	0,8 ± 0,1 Aa	14,6 ± 1,0 Aa	13,6 ± 0,6 Aa
40	Selenato	58,0 ± 5,0 Aa	0,8 ± 0,1 Aa	14,2 ± 1,2 Aa	13,6 ± 0,8 Aa
	Selenito	54,6 ± 2,6 Aa	0,8 ± 0,1 Aa	13,4 ± 0,6 Aa	12,8 ± 0,5 Aa
80	Selenato	55,1 ± 1,6 Aab	0,8 ± 0,1 Aa	13,5 ± 0,4 Aab	13,0 ± 0,4 Aab
	Selenito	57,1 ± 1,8 Aa	0,8 ± 0,1 Aa	14,0 ± 0,4 Aa	13,3 ± 0,4 Aa
160	Selenato	46,3 ± 9,2 Ac	1,0 ± 0,1 Aa	11,5 ± 2,2 Ac	11,5 ± 1,7 Ac
	Selenito	44,1 ± 4,4 Ab	1,0 ± 0,1 Aa	10,9 ± 1,0 Ab	11,3 ± 0,9 Ab

Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre fontes de Se, e letras menores indicam diferença entre taxas de Se de acordo com o teste de Tukey (p≤0,05).

### 3.3 Análise de componentes principais

Na Figura 7 evidencia os principais conjuntos de resposta às doses de selenato de sódio em cana-de-açúcar. Em síntese, observa-se que o tratamento com 40 g ha<sup>-1</sup>

<sup>1</sup> tem maior conjunto de correlações positivas como variáveis de crescimento e qualidade tecnológica de interesse agrônomo, como a pureza, °Brix, Pol, diâmetro de perfilho, número de perfilho e massa seca de raiz. Por outro lado, observa-se a dose de 160 g ha<sup>-1</sup> de selenato de sódio correlacionou positivamente com conjunto de variáveis relacionadas ao estresse oxidativo, como o MDA, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e sacarose na folha.

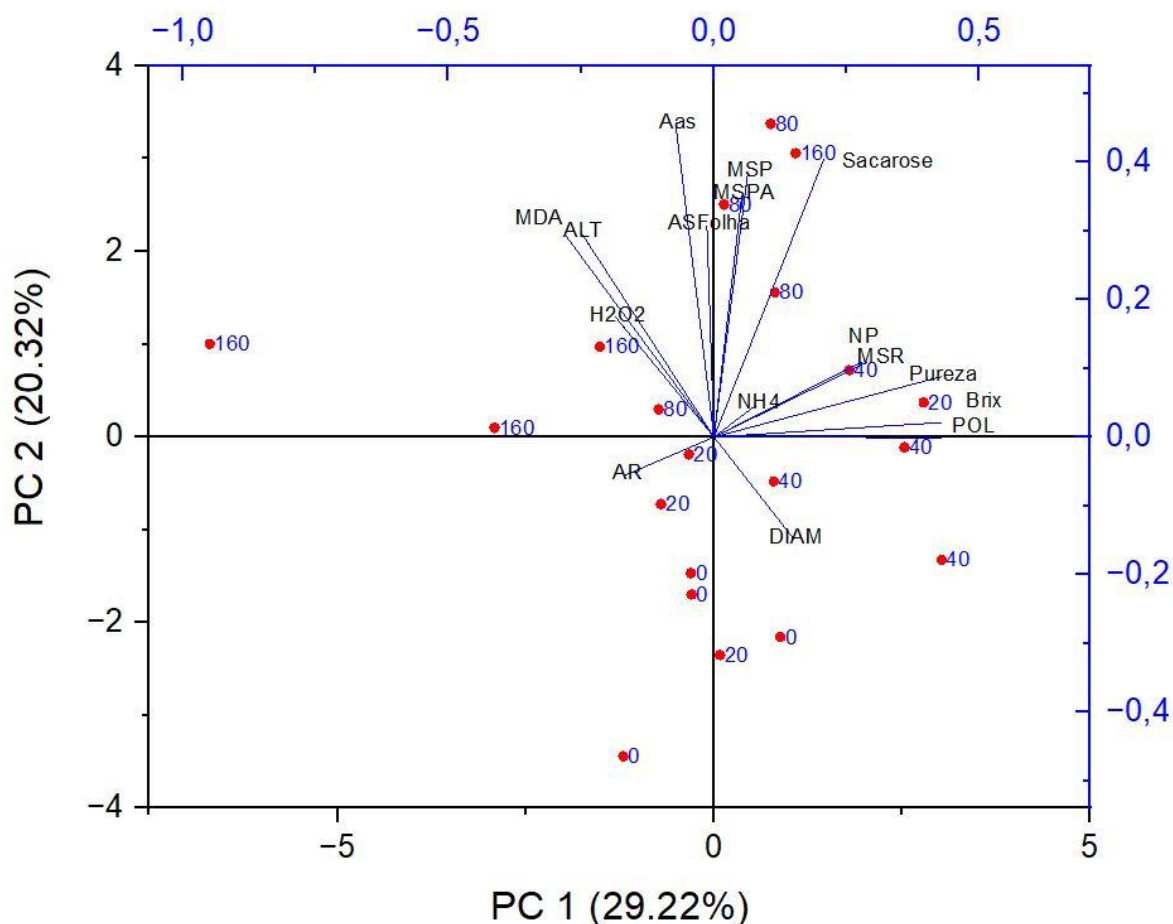


Figura 7 – Análise de componentes principais das doses de selenato de sódio com variáveis de crescimento, bioquímica e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. MDA – malondialdeído; ALT – altura; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> – peróxido de hidrogênio; Aas – aminoácidos; ASFolha – açúcar solúvel na folha; MSPA – massa seca da parte aérea, MSP – massa do perfilho; NH<sub>4</sub> – amônia; NP – número de perfilhos; MSR – massa seca da raiz; DIAM – diâmetro; AR – açúcar redutor.

Quanto ao selenito de sódio, observa-se que o tratamento com 20 g ha<sup>-1</sup> tem maior conjunto de correlações positivas como variáveis de crescimento e qualidade tecnológica de interesse agrônomo, como a altura, açúcar solúvel na folha, número

de perfilhos, massa seca de raiz e parte aérea, pureza, Pol e °Brix. Por outro lado, observa-se a dose de 160 g ha<sup>-1</sup> de selenato de sódio correlacionou positivamente com conjunto de variáveis relacionadas ao estresse oxidativo, como o MDA, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, aminoácidos na folha e sacarose na folha.

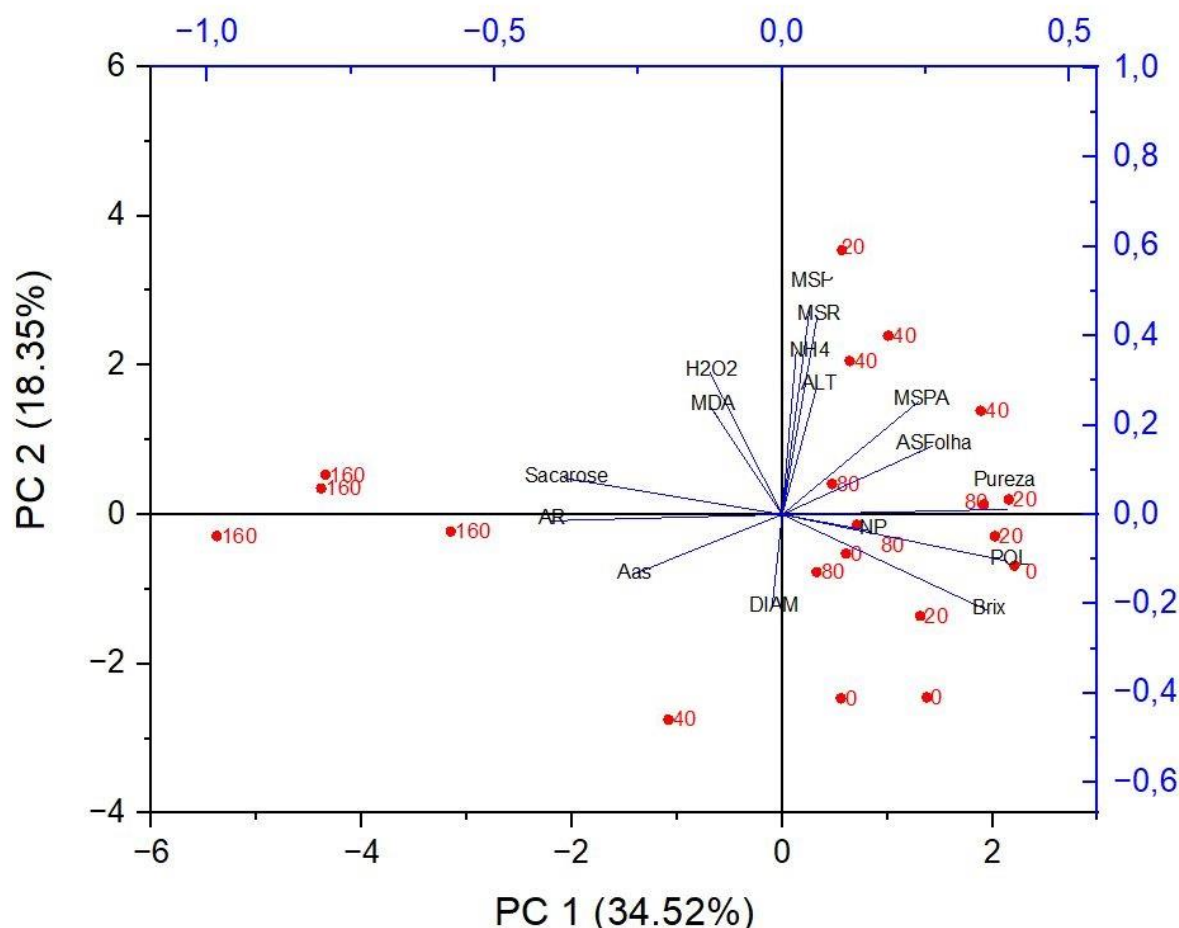


Figura 8 – Análise de componentes principais das doses de selenito de sódio com variáveis de crescimento, bioquímica e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. MDA – malondialdeído; ALT – altura; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> – peróxido de hidrogênio; Aas – aminoácidos; ASFolha – açúcar solúvel na folha; MSPA – massa seca da parte aérea, MSP – massa do perfilho; NH<sub>4</sub> – amônia; NP – número de perfilhos; MSR – massa seca da raiz; DIAM – diâmetro; AR – açúcar redutor.

#### 4. DISCUSSÃO

Os resultados desse estudo demonstraram claramente as faixas de dose e as fontes de Se que resultaram em efeitos benéficos e fitotóxicos em cana-de-açúcar, visando direcionar o manejo de Se para beneficiar os cultivos comerciais e minimizar

injurias decorrentes do estresse causado pelo excesso da Se-fertilização. A fitotoxicidade e o benefício do Se para a cana-de-açúcar estão intimamente associados com a Se-fonte e a Se-dose (Figuras 7 e 8), sendo que respostas benéficas são observadas com 40 e 20 g ha<sup>-1</sup> utilizando selenato e selenito, respectivamente, e a fitotoxicidade é observada para ambas as Se-fontes com 160 g ha<sup>-1</sup>. O presente estudo mostrou os efeitos decorrentes da fonte de Se a ser utilizada na adubação foliar, sendo que o selenito de sódio resultou em aumento de cerca de 2,5x na concentração de Na no tecido foliar comparado ao selenato de sódio (Figura 2A). Essa resposta foi observada em todas as doses de Se (Figura 2B, C) devido ao efeito do íon acompanhante do selenito que tem 26.6% de sódio na sua composição molecular, enquanto que o selenato tem 24.3% de Na. Adicionalmente, o selenito de sódio foi capaz de aumentar em cerca de 1,5x a concentração de Se comparado ao selenato de sódio (Figura 2D), seguindo o mesmo padrão de resposta em todas as dosagens de Se aplicadas (Figura 2E, F).

Diversos estudos como os de Jiang et al. (2021), Li et al. (2020) e Zhang et al. (2019) tem relatado que o selenito é convertido rapidamente em formas orgânicas no local onde é disponibilizado o elemento, ao contrário do selenato que pode ser translocado para demais órgãos da planta. O presente estudo vem a agregar novas informações sobre o selenito, pois torna-se o efeito salino em razão do íon acompanhante (sódio) um fator que intensifica o potencial do selenito de ocasionar fitotoxicidade em doses mais baixas do que o selenato de sódio.

Segundo Pacheco et al. (2013) e Passamani et al. (2017) exposições da cana ao estresse salino com sódio reduz drasticamente a massa fresca da cana-de-açúcar. Tal observação se mostra mais robusta quando analisamos o efeito das doses de selenato e selenito de sódio sobre o crescimento das plantas, onde a massa seca da parte aérea e da raiz, número e massa de perfilhos foram reduzidas na dose de 80 g ha<sup>-1</sup> de selenito de sódio, enquanto que esse efeito negativo foi observado com selenato de sódio somente com a dose de 160 g ha<sup>-1</sup> (Tabela 1).

Notavelmente, o Se teve efeito benéfico em cana-de-açúcar aumentando a massa seca de raiz e o número de perfilhos por planta a uma dose de 20 g ha<sup>-1</sup> de selenato e 40 g ha<sup>-1</sup> de selenito. Por outro lado, o efeito fitotóxico foi observado na massa da raiz e número de perfilhos a partir das doses de 80 g ha<sup>-1</sup> de selenito e 160

g ha<sup>-1</sup> de selenato. Portanto, cabe-se ressaltar que tanto os sintomas benéficos quanto os sintomas fitotóxicos sobre o crescimento das plantas são observados em doses menores utilizando o tratamento com selenito comparado ao tratamento com selenato devido aos efeitos combinados de rapidez na assimilação de Se em formas orgânicas e também em razão do íon acompanhante.

Baixas concentrações de Se são benéficas para o crescimento da cana-de-açúcar (Tabela 1 e Figura 5) devido aos seus efeitos integrativos nas plantas, como já relatados na literatura com efeitos positivos na biossíntese de pigmentos fotoprotetores, e aumentos induzidos por Se no metabolismo antioxidante, além de atuar em mecanismos fisiológicos para aumentar o desempenho fotossintético, a biossíntese de carboidratos e, conseqüentemente, a massa seca e produtividade das culturas (Lanza e Reis, 2021; Silva et al., 2021, 2018).

Além de respostas positivas no crescimento da cana-de-açúcar, tais efeitos também se estenderam à qualidade tecnológica do caldo obtido, conforme observado na Tabela 2. A porcentagem de sacarose, °Brix e Pol do caldo foi melhorada utilizando doses a partir de 40 e 20 g ha<sup>-1</sup> de selenato e selenito de sódio, respectivamente. Segundo Silva et al. (2018) o Se em doses benéficas auxilia na biossíntese de pigmentos acessórios como a clorofila b que têm função de fotoproteção do complexo antena contra estresses ambientais. Esse efeito fotoprotetor induzido por Se certamente aumentou a fotossíntese líquida para produção de carboidratos e posterior acúmulo de sacarose no colmo da cana-de-açúcar (Tabela 2).

A cana-de-açúcar tem a capacidade de armazenar sacarose no colmo como principal forma de reserva e tal característica é vastamente explorada pela agroindústria de modo a contribuir com mais de 80% da produção mundial de sacarose (Li et al., 2022). O alto teor de sacarose é um dos principais objetivos no melhoramento da cana-de-açúcar. No entanto, apesar dos esforços de melhoramento convencional sustentados a longo prazo, o teor de sacarose na cana-de-açúcar permanece estável por décadas (Chen et al., 2021). Dessa forma, algumas estratégias de manejo, como a adubação com elementos que favorecem o acúmulo de sacarose no colmo é uma alternativa a curto prazo para verticalizar a produção de açúcar global. No presente estudo, a adubação foliar com Se em baixas doses se mostrou como

uma alternativa eficiente para aumentar a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar (Tabela 2).

Os efeitos fitotóxicos do Se foram observados principalmente no crescimento da cana-de-açúcar, com reduções drásticas na massa seca da parte aérea, raiz, número e massa de perfilhos (Tabela 1), associados a perdas na qualidade tecnológica, com redução na concentração de sacarose, °Brix e pol do caldo obtido (Tabela 2). Esse efeito foi observado porque o Se em altas doses provoca estresse oxidativo, o que gera um aumento anormal das espécies reativas de oxigênio (Hasanuzzaman et al., 2020).

No presente trabalho foi possível observar aumento anormal de MDA e  $H_2O_2$  nas doses fitotóxicas do Se para a cana-de-açúcar (Figura 6E e 6F). Essas EROS degradam biomoléculas vitais para as plantas, como proteínas, DNA, RNA e lipídeos que resulta na diminuição do crescimento e rendimento das culturas (Kolbert et al., 2019). Segundo Gouveia et al. (2020) estudando arroz tratado com doses altas de Se observaram a presença de clorose, aumento do estresse oxidativo monitorado pelo aumento de MDA e  $H_2O_2$ , resultando na redução do crescimento da parte aérea e raiz das plantas.

Curiosamente, nas doses fitotóxicas de selenato e selenito houve aumento na concentração de alguns compostos do metabolismo primário, como os açúcares solúveis, sacarose, aminoácidos e amônia (Figura 6A-D). O Se em alta dosagem pode causar uma modificação no metabolismo de carboidratos visando atenuar o estresse oxidativo causado pela fitotoxicidade por meio de ajustes na atividade enzimática, sinalização e adaptação a situações estressantes (Silva et al., 2018). O aumento de açúcares solúveis observado no presente estudo (Figura 6A) pode estar relacionado a ajustes metabólicos na via das pentoses fosfato, especialmente, na enzima glicose-6-fosfato desidrogenase visando à redução da produção de energia, que contribuem para a eliminação de EROs nos cloroplastos, pois a respiração produz naturalmente  $H_2O_2$  no nível citosólico (Bolouri-Moghaddam et al., 2010).

Além disso, os carboidratos (sacarose, trealose, rafinoses, galactinol, e. g.) e aminoácidos (Prolina, ácido gama-aminobutírico, e. g.) são um dos principais osmólitos em plantas, os quais ajudam manter o estado de homeostase em condições de estresse abiótico visando proteger a maquinaria celular contra as EROS (Ghosh et

al., 2021). Por isso, no presente trabalho (Figura 6 observamos aumento de sacarose e aminoácidos que pode estar relacionado a uma resposta de ajuste osmótico para manter a célula túrgida para o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar em condições de estresse pelo Se-fitotoxicidade (Cao et al., 2014; Ghosh et al., 2021).

Além disso, o estresse oxidativo ocasionado pelo Se-toxicidade em cana-de-açúcar (Figura 6E e 6F) pode ter contribuído para degradação de proteínas, o que também pode ser uma resposta quanto o aumento na concentração de amônia e aminoácidos nessas condições (Figura 6C e 6D). Segundo Silva et al. (2018) e Gouveia et al. (2020) o aumento na concentração de compostos nitrogenados de plantas sob estresse está relacionado com a desnaturação de proteínas e oxidação de pigmentos fotossintéticos em razão do estresse oxidativo causado pelo excesso de Se. Na Figura 7 mostra o resumo das principais respostas quanto aos efeitos benéficos e fitotóxicos em função da dose de Se.

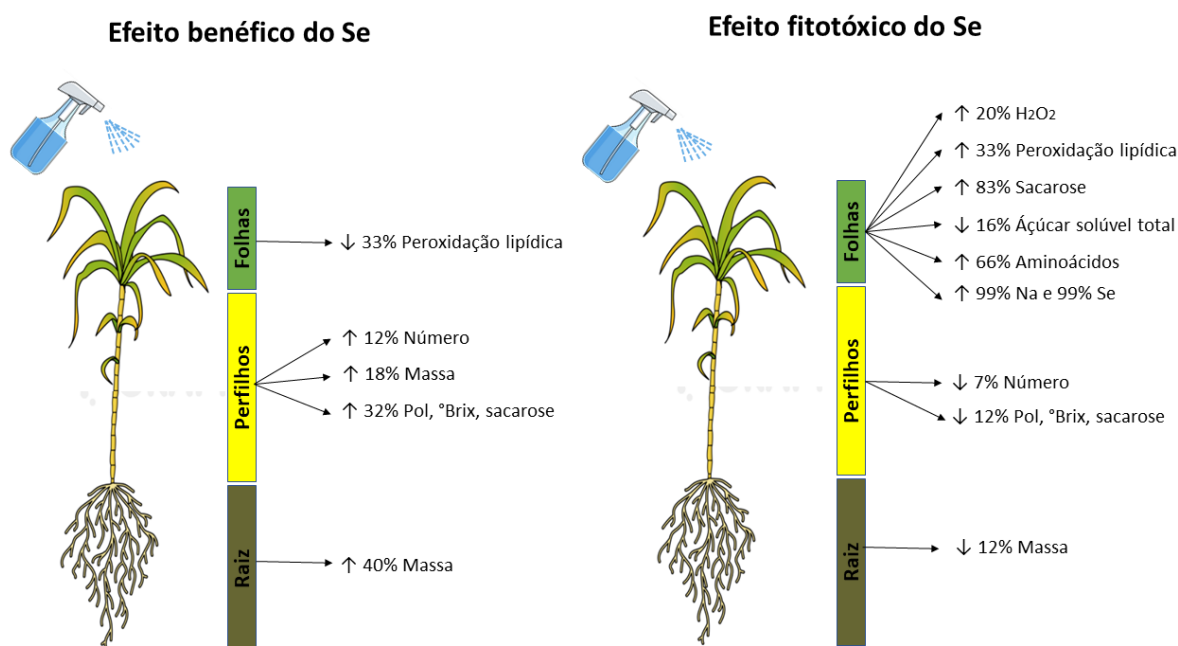


Figura 9 - Mecanismo proposto dos efeitos benéficos e fitotóxicos do selênio na cana-de-açúcar

No presente trabalho foi observado aumento na concentração de Ca no tecido foliar da cana-de-açúcar sob doses fitotóxicas de Se (Figura 3D). Silva et al. (2018) e (Lanza et al., 2021) em plantas de feijão-caupi sob condição de estresse devido a Se-

fitotoxicidade, observaram em tecidos necróticos da folha deposição de Ca e Se por meio da técnica de espectroscopia de fluorescência de raio X. Esse acúmulo de cálcio em regiões com sintomas de toxicidade de necrose também foi observado para outros metais, como o Mn (Montanha et al., 2020; Santos et al., 2017). Na literatura existem relatos que o cálcio tem papel essencial na estabilização das membranas celulares e na osmorregulação, o que permite que as plantas expostas a agentes estressantes desenvolvam processos que impedem a degradação celular (Hawkesford et al., 2011).

A concentração de Mg na folha da cana-de-açúcar foi aumentada conforme incremento da dose de Se, principalmente, quando utilizou a fonte selenito (Figura 3E). Observou-se também que doses fitotóxicas de Se resultaram em aumento na concentração de enxofre em cana-de-açúcar (Figura 3F). Sabe-se que a biossíntese de GSH ocorre no ambiente intracelular por meio da ação sequencial de duas enzimas. Na primeira reação, catalisada pela  $\gamma$ -glutamylcisteína sintetase, é formada uma ligação peptídica entre os aminoácidos ácido glutâmico e cisteína, resultando na formação de  $\gamma$ -L-glutamyl-L-cisteína. Este dipeptídeo é então ligado à glicina através da ação da glutathione sintetase. Ambas as etapas requerem ATP e  $Mg^{+2}$  (Dorion et al., 2021).

Provavelmente, o aumento da concentração de S (Figura 3F) se deve a degradação de proteínas atacadas por EROS em razão da Se-fitotoxicidade (Gouveia et al., 2020), as quais liberam aminoácidos contendo S, como a cisteína, que é um dos precursores da primeira fase da rota de biossíntese de GSH. Enquanto que o aumento da concentração de Mg (Figura 3E) se deve ao papel do Mg como ativador enzimático nas duas etapas da biossíntese de GSH. Além disso, o aumento da concentração de S pode estar relacionado com o estímulo do ciclo catalítico de GSH, transformando-a em glutathione dissulfeto (GSSG) para regeneração da atividade antioxidante celular (Czerniawski e Bednarek, 2018).

A glutathione é um metabólito essencial para a vida vegetal, conhecido por seu papel no controle de EROS. A glutathione também está envolvida na desintoxicação do metilglioxal (MG), que, assim como as EROS, é produzida em baixos níveis pelo metabolismo aeróbico em condições normais. Embora alguns processos fisiológicos dependam de EROS e MG, vários estresses podem aumentar significativamente suas

concentrações, levando a efeitos potencialmente prejudiciais (Kammerscheit et al., 2020).

Segundo Gui et al. (2022) existem vários trabalhos que mostram que o Se tem efeito antagônico com micronutrientes, tais como o Fe, Zn, Cu, Mn, Ni, Cl e B. Porém, os mesmos autores descreveram que existem efeitos bidirecionais específicos onde o Se pode desencadear o acúmulo desses micronutrientes. No presente trabalho, observou-se que houve aumento da concentração de Zn, Mn e Fe em cana-de-açúcar conforme aumento da dose de Se (Figura 4). Em plantas existem relatos de algumas isoformas da enzima superóxido dismutase (SOD), que são proteínas oligoméricas contendo metais com cofatores como Fe, Zn, Cu, Mn. Tal enzima é responsável pela primeira linha de defesa convertendo o  $O_2^{\cdot-}$  citotóxico em  $H_2O_2$  (Gill et al., 2015).

Portanto, o acúmulo desses micronutrientes se deve ao mecanismo de defesa da planta para combater o estresse oxidativo causado pelo excesso de Se em cana-de-açúcar (Figura 6E e 6F). As isoformas de SOD são diferencialmente expressas em função do tipo de estresse, a espécie vegetal e mecanismos de regulação do sistema antioxidante de defesa (Mosa et al., 2018). Todavia, observa-se que as isoformas Zn-SOD, Mn-SOD e Fe-SOD foram estimuladas para combater as EROS em cana-de-açúcar sob Se-fitotoxicidade.

## 5 CONCLUSÃO

A dose benéfica de selenato é de  $40 \text{ g ha}^{-1}$  e do selenito de  $20 \text{ g ha}^{-1}$ . O efeito benéfico do Se em cana-de-açúcar está relacionado ao aumento da massa de raiz, número e massa de perfilhos. Além disso, o Se-benéfico melhorou a qualidade tecnológica com aumento da concentração de sacarose, pol e °Brix do caldo obtido.

A dose fitotóxica de selenato e do selenito de  $160 \text{ g ha}^{-1}$ . A fitotoxicidade do Se foi caracterizada com redução do crescimento da raiz e parte aérea da cana-de-açúcar aliado a perdas na qualidade tecnológica do caldo obtido. Além disso, a Se-fitotoxicidade promoveu acúmulo de osmólitos (aminoácidos e sacarose) via homeostase do metabolismo de carboidratos e degradação de proteínas visando minimizar o estresse oxidativo ( $H_2O_2$  e MDA). Além disso, a fitotoxidez desencadeou

na cana-de-açúcar o concentração de Ca, Mg, Zn, Fe, Mn e S como estratégia nutricional para acionar mecanismos enzimáticos e não enzimáticos para mitigar o estresse ocasionado pelo excesso de Se.

## 6. REFERÊNCIAS

Alexieva, V., Sergiev, I., Mapelli, S., Karanov, E. (2001). The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant Cell Environmental** 24:1337–1344. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x>.

Andrade FR, da Silva GN, Guimarães KC, Barreto HBF, de Souza KRD, Guilherme LRG, Faquin V, Reis AR dos (2018) Selenium protects rice plants from water deficit stress. **Ecotoxicology Environmental Safety** 164:562–570. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.022>

Anjum UA, Imran K, Mohsin T, Muhammad S, Abdul S, Longchang W (2017). Phyto-Toxicity of Chromium in Maize: Oxidative Damage, Osmolyte Accumulation, Anti-Oxidative Defense and Chromium Uptake. **Pedosphere** 27:262-273. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60315-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60315-1).

Bieleski RL, Turner NA. (1966). Separation and estimation of amino acids in crude plant extracts by thin-layer electrophoresis and chromatography. **Analytic Biochemistry** 17: 278–293.

Bolouri-Moghaddam MR, Le Roy K, Xiang L, Rolland F, Van Den Ende W (2010) Sugar signalling and antioxidant network connections in plant cells. **FEBS Journal** 277:2022–2037. <https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2010.07633.x>

Cabral Gouveia GC, Galindo FS, Dantas Bereta Lanza MG, Caroline da Rocha Silva A, Pereira de Brito Mateus M, Souza da Silva M, Rimoldi Tavanti RF, Tavanti TR, Lavres J, Reis AR dos (2020) Selenium toxicity stress-induced phenotypical, biochemical and physiological responses in rice plants: Characterization of symptoms and plant metabolic adjustment. **Ecotoxicology Environmental Safety** 202:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110916>

Cao YY, Yang MT, Li X, Zhou ZQ, Wang XJ, Bai JG (2014) Exogenous sucrose increases chilling tolerance in cucumber seedlings by modulating antioxidant enzyme

activity and regulating proline and soluble sugar contents. **Scientia Horticulture** 179:67–77. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.09.016>

Chen D, Zhou W, Yang J, Ao J, Huang Y, Shen D, Jiang Y, Huang Z, Shen H (2021) Effects of Seaweed Extracts on the Growth, Physiological Activity, Cane Yield and Sucrose Content of Sugarcane in China. **Frontiers Plant Science** 12:1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.659130>

Consecana. **Manual de Instruções**. Piracicaba: Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo, 5. Ed., 2006, 111 p.

Czerniawski P, Bednarek P (2018) Glutathione S-transferases in the biosynthesis of sulfur-containing secondary metabolites in brassicaceae plants. **Frontiers Plant Science** 871:1–8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01639>

Dubois M, Gilles K, Hamilton JK, Rebers PA, Smith F (1951) A colorimetric method for the determination of sugars. **Nature** 168:167. <https://doi.org/10.1038/168167a0>

Elkelish AA, Soliman MH, Alhaithloul HA, El-Esawi MA (2019) Selenium protects wheat seedlings against salt stress-mediated oxidative damage by up-regulating antioxidants and osmolytes metabolism. **Plant Physiology Biochemistry** 137:144–153. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.02.004>

Garcia-Marquez V, Alvaro MM, Adalberto BM, Macias JM (2020) Ionic Selenium and Nanoselenium as Biofortifiers and Stimulators of Plant Metabolism. **Agronomy** 10:1-14. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091399>

Ghosh UK, Islam MN, Siddiqui MN, Khan MAR (2021) Understanding the roles of osmolytes for acclimatizing plants to changing environment: a review of potential mechanism. **Plant Signaling & Behavior** 16:46–49. <https://doi.org/10.1080/15592324.2021.1913306>

Gill SS, Anjum NA, Gill R, Yadav S, Hasanuzzaman M, Fujita M, Mishra P, Sabat SC, Tuteja N (2015) Superoxide dismutase—mentor of abiotic stress tolerance in crop plants. **Environmental Science Pollution Research** 22:10375–10394. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4532-5>

Guan DX, Dai ZH, Sun HJ, Ma LQ (2022) Arsenic and selenium in the plant-soil-human ecosystem: CREST publications during 2018–2021. **Critical Review**

**Environmental Science Technology** 52:3567–3572.

<https://doi.org/10.1080/10643389.2021.2010836>

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

Hasanuzzaman M, Bhuyan MHMB, Raza A, Hawrylak-Nowak B, Matraszek-Gawron R, Mahmud J AI, Nahar K, Fujita M (2020) Selenium in plants: Boon or bane?

**Environmental Experimental Botany** 178:1-14.

<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104170>

Heath, L. R.; Packer L (1968) Photoperoxidation in isolated Chloroplasts of Fatty Acid Peroxidation In 1965 we observed that isolated chloroplasts upon illumination produce substances which react with thiobarbituric signify An investigation has therefore been under- Isolated should. **Biochemistry Biophysical** 125:189–198

Hosseinzadeh Rostam Kalaei M, Abdossi V, Danaee E (2022) Evaluation of foliar application of selenium and flowering stages on selected properties of Iranian Borage as a medicinal plant. **Scientific Report** 12:1–10.

<https://doi.org/10.1038/s41598-022-16241-z>

Jiang C, Zu C, Lu D, Zheng Q, Shen J, Wang H, Li D (2017) Effect of exogenous selenium supply on photosynthesis, Na<sup>+</sup> accumulation and antioxidative capacity of maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. **Scientific Report** 7:1–14.

<https://doi.org/10.1038/srep42039>

Jiang H, Lin W, Jiao H, Liu J, Chan L, Liu X, Wang R, Chen T (2021) Uptake, transport, and metabolism of selenium and its protective effects against toxic metals in plants: a review. **Metallomics** 13:1–11. <https://doi.org/10.1093/mtomcs/mfab040>

Jozwiak W, Politycka B (2019) Effect of Selenium on Alleviating Oxidative Stress Caused by a Water Deficit in Cucumber Roots. **Plants** 8:1–18

Kammerscheit X, Hecker A, Rouhier N, Chauvat F, Cassier-Chauvat C (2020) Methylglyoxal detoxification revisited: Role of glutathione transferase in model cyanobacterium *Synechocystis* sp. strain PCC 6803. **MBio** 11:1–13. <https://doi.org/10.1128/mBio.00882-20>.

Kolbert Z, Molnár, Feigl G, Van Hoewyk D (2019) Plant selenium toxicity: Proteome in the crosshairs. **Journal Plant Physiology** 232:291–300. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.11.003>

Kushwaha A, Goswami L, Lee J, Sonne C, Brown RJC, Kim KH (2022) Selenium in soil-microbe-plant systems: Sources, distribution, toxicity, tolerance, and detoxification. **Critical Review Scientific Report Science Technology** 52:2383–2420. <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1883187>

Lanza MGDB, Reis AR dos (2021) Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. **Plant Physiology Biochemistry** 164:27–43. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.026>

Lanza MGDB, Silva VM, Montanha GS, Lavres J, Pereira de Carvalho HW, Reis AR dos (2021) Assessment of selenium spatial distribution using  $\mu$ -XFR in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) plants: Integration of physiological and biochemical responses. **Ecotoxicol Scientific Report Safety** 207. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111216>

Li AM, Chen ZL, Qin CX, Li ZT, Liao F, Wang MQ, Lakshmanan P, Li YR, Wang M, Pan YQ, Huang DL (2022) Proteomics data analysis using multiple statistical approaches identified proteins and metabolic networks associated with sucrose accumulation in sugarcane. **BMC Genomics** 23:1–14. <https://doi.org/10.1186/s12864-022-08768-2>

Li Y, Zhu N, Liang X, Zheng L, Zhang C, Li YF, Zhang Z, Gao Y, Zhao J (2020) A comparative study on the accumulation, translocation and transformation of selenite, selenate, and SeNPs in a hydroponic-plant system. **Ecotoxicology Environmental Safety** 189:109955. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109955>

Li Z, Liang D, Peng Q, Cui Z, Huang J, Lin Z (2017) Interaction between selenium and soil organic matter and its impact on soil selenium bioavailability: A review. **Geoderma** 295:69–79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.02.019>

Marin FR, Inman-Bamber G, Silva TGF, Vianna MS, Nassif DSP, Carvalho KS (2020) Sugarcane evapotranspiration and irrigation requirements in tropical climates. **Theoretical Applied Climatology** 140:1349–1357. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03161-z>

McCullough H (1967) The determination of ammonia in whole blood by a direct colorimetric method. **Clinical Chemistry Acta** 17:297–304.

Montanha GS, Rodrigues ES, Marques JPR, De Almeida E, Dos Reis AR, Pereira De Carvalho HW (2020) X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) applied to plant science: Challenges towards: In vivo analysis of plants. **Metallomics** 12:183–192. <https://doi.org/10.1039/c9mt00237e>

Morales-Espinoza MC, Cadenas-Pliego G, Pérez-Alvarez M, Hernández-Fuentes AD, De La Fuente MC, Benavides-Mendoza A, Valdés-Reyna J, Juárez-Maldonado A (2019) Se nanoparticles induce changes in the growth, antioxidant responses, and fruit quality of tomato developed under NaCl stress. **Molecules** 24. <https://doi.org/10.3390/molecules24173030>

Mosa KA, El-Naggar M, Ramamoorthy K, Alawadhi H, Elnaggar A, Wartanian S, Ibrahim E, Hani H (2018) Copper nanoparticles induced genotoxicity, oxidative stress, and changes in superoxide dismutase (SOD) gene expression in cucumber (*Cucumis sativus*) plants. **Frontiers Plant Science** 9:1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00872>

Mostofa MG, Mezanur R, Nurealam S, Masayuki F, Lam-Son PT (2020) Salicylic acid antagonizes selenium phytotoxicity in rice: selenium homeostasis, oxidative stress metabolism and methylglyoxal detoxification; **Journal of Hazardous Materials** 394:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122572>.

Pacheco CM, Pestana-Calsa MC, Gozzo FC, Mansur Custodio Nogueira RJ, Menossi M, Calsa T (2013) Differentially delayed root proteome responses to salt stress in sugar cane varieties. **Journal Proteome Research** 12:5681–5695. <https://doi.org/10.1021/pr400654a>

Passamani LZ, Barbosa RR, Reis RS, Heringer AS, Rangel PL, Santa-Catarina C, Grativol C, Veiga CFM, Souza-Filho GA, Silveira V (2017) Salt stress induces changes in the proteomic profile of micropropagated sugarcane shoots. **PLoS One** 12:1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176076>

Pokhrel GR, Wang KT, Zhuang HM, Wu YC, Chen W, Lan Y, Zhu X, Li Z, Fu FF, Yang G Di (2020) Effect of selenium in soil on the toxicity and uptake of arsenic in rice plant. **Chemosphere** 239:124712. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124712>

Rady MM, Belal HEE, Gadallah FM, Semida WM (2020) Selenium application in two methods promotes drought tolerance in *Solanum lycopersicum* plant by inducing the antioxidant defense system. **Scientia Horticulture** 266:109290. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109290>

Raij, B. van; Andrade, J.C.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, **Instituto Agrônômico**, 2001. 285p.

Reis HPG, Barcelos JP de Q, Junior EF, Santos EF, Silva VM, Moraes MF, Putti FF, Reis AR dos (2018) Agronomic biofortification of upland rice with selenium and nitrogen and its relation to grain quality. **Journal Cereal Science** 79:508–515. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.01.004>

Saleem MF, Kamal MA, Shahid M, Awais M, Saleem A, Raza MAS, Ma BL (2021) Studying the foliar selenium-modulated dynamics in phenology and quality of terminal heat-stressed cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in association with yield. **Plant Biosystem** 155:668–678. <https://doi.org/10.1080/11263504.2020.1779835>

Santos EF, Kondo Santini JM, Paixão AP, Júnior EF, Lavres J, Campos M, Reis AR dos (2017) Physiological highlights of manganese toxicity symptoms in soybean plants: Mn toxicity responses. **Plant Physiology Biochemistry** 113:6–19. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.01.022>

Silva VM, Boleta EHM, Lanza MGDB, Lavres J, Martins JT, Santos EF, dos Santos FLM, Putti FF, Junior EF, White PJ, Broadley MR, Carvalho HWP de, Reis AR dos (2018) Physiological, biochemical, and ultrastructural characterization of selenium toxicity in cowpea plants. **Environmental Experimental Botany** 150:172–182. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.020>

Silva VM, Boleta EHM, Martins JT, dos Santos FLM, da Rocha Silva AC, Alcock TD, Wilson L, de Sá ME, Young SD, Broadley MR, White PJ, dos Reis AR (2019) Agronomic biofortification of cowpea with selenium: effects of selenate and selenite applications on selenium and phytate concentrations in seeds. **Journal Science Food Agriculture** 99:5969–5983. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9872>

Silva VM, Nardeli AJ, Mendes NAC, Alcock TD, Rocha M de M, Putti FF, Wilson L, Young SD, Broadley MR, White PJ, Reis AR dos (2021) Application of sodium selenate to cowpea (*Vigna unguiculata* L.) increases shoot and grain Se partitioning

with strong genotypic interactions. **Journal Trace Element Medicine Biology** 67. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2021.126781>

Silva VM, Rimoldi Tavanti RF, Gratão PL, Alcock TD, Reis AR dos (2020) Selenate and selenite affect photosynthetic pigments and ROS scavenging through distinct mechanisms in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) walp) plants. **Ecotoxicology Environmental Safety** 201:110777. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110777>

Song T, Su X, He J, Liang Y, Zhou T, Liu C (2018) Selenium (Se) uptake and dynamic changes of Se content in soil–plant systems. **Environmental Science Pollution Research** 25:34343–34350. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3373-4>

Ul Hassan Z, Razaqat AG, Skhawat A, Theodore MM, Basharat A, Jian W, Qian H, Rukhsanda A, Weijun Z (2019) Dual behavior of selenium: Insights into physio-biochemical, anatomical and molecular analyses of four *Brassica napus* cultivars. **Chemosphere** 225:329-341. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.028>.

Van Handel E (1968) Direct microdetermination of sucrose. *Anal Biochem* 22:280–283. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(68\)90317-5](https://doi.org/10.1016/0003-2697(68)90317-5)

Wang K, Wang Y, Li K, Wan Y, Wang Q, Zhuang Z, Guo Y, Li H (2020) Uptake, translocation and biotransformation of selenium nanoparticles in rice seedlings (*Oryza sativa* L.). **Journal Nanobiotechnology** 18:1–15. <https://doi.org/10.1186/s12951-020-00659-6>

Xu X, Yan M, Liang L, Lu Q, Han J, Liu L, Feng X, Guo J, Wang Y, Qiu G (2019) Impacts of selenium supplementation on soil mercury speciation, and inorganic mercury and methylmercury uptake in rice (*Oryza sativa* L.). **Environmental Pollution** 249:647–654. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.095>

Yang H, Yang X, Ning Z, Kwon SY, Li ML, Tack FMG, Kwon EE, Rinklebe J, Yin R (2022) The beneficial and hazardous effects of selenium on the health of the soil-plant-human system: An overview. **Journal Hazard Materials** 422. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126876>

Yemm EW, Cocking EC, Ricketts RE (1955) The determination of amino-acids with ninhydrin. **Analyst** 80:209–214. <https://doi.org/10.1039/AN9558000209>

Zhang H, Zhao Z, Zhang X, Zhang W, Huang L, Zhang Z, Yuan L, Liu X (2019) Effects of foliar application of selenate and selenite at different growth stages on

Selenium accumulation and speciation in potato (*Solanum tuberosum* L.). **Food Chemistry** 286:550–556. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.185>

Zhao Y, Hu C, Wu Z, Liu X, Cai M, Jia W, Zhao X (2019) Selenium reduces cadmium accumulation in seed by increasing cadmium retention in root of oilseed rape (*Brassica napus* L.). **Environmental Experimental Botany** 158:161–170. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.11.017>

Zhou X, Yang J, Kronzucker HJ, Shi W (2020) Selenium Biofortification and Interaction With Other Elements in Plants: A Review. **Frontiers Plant Science** 11:1–18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.586421>.

Zhou, Y., Tang, Q., Wu, M (2018). Comparative transcriptomics provides novel insights into the mechanisms of selenium tolerance in the hyperaccumulator plant *Cardamine hupingshanensis*. **Scientific Report** 8: 2789. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21268-2>

### **CAPÍTULO 3** - Resposta fisiológica do selênio na fotossíntese, crescimento vegetal, qualidade tecnológica e produtividade da cana-de-açúcar

**RESUMO** - O selênio (Se) é um elemento benéfico para as plantas através do seu estímulo do metabolismo antioxidante, atividade fotossintética e produtividade agrícola. Entretanto, as respostas fisiológicas associadas ao crescimento e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar em resposta ao Se ainda não são escassas. Além disso, não está documentado qual é a fonte e dose recomendada de Se bem como os níveis críticos de fitotoxicidade. O presente estudo teve como objetivo caracterizar as respostas benéficas e fitotóxicas associadas à fonte e à taxa aplicada de selênio sobre a fotossíntese, crescimento, produtividade e qualidade da cana-de-açúcar utilizando quatro concentrações de Se (0, 20, 40, 80, 160 g ha<sup>-1</sup>) e duas fontes de Se (selenato e selenito de sódio). Em geral, o efeito benéfico da aplicação de Se em cana-de-açúcar diferiu entre as fontes, sendo que para selenato de sódio a dose benéfica foi de 40 g ha<sup>-1</sup> e selenito de sódio foi a 20 g ha<sup>-1</sup>. Esses efeitos benéficos do Se estão associados aos efeitos sinérgicos Ca, Mg, K, Fe, Zn, S, Mn e B, aumento de pigmentos e atividade fotossintética, eficiência do uso da água, índice de crescimento, crescimento das raízes e acúmulo de açúcar nos colmos. Para ambas fontes de Se, doses acima de 80 g ha<sup>-1</sup> resultaram na redução de pigmentos fotossintéticos, atividade fotossintética, crescimento da parte aérea e raiz, além de redução no acúmulo de açúcar nos colmos. Os resultados desse estudo demonstraram claramente o papel benéfico da aplicação foliar do Se em baixas concentrações e sua utilização tem potencial de aumentar a sustentabilidade e produtividade da cana-de-açúcar em condições de campo.

**Palavras-chave:** Estresse abiótico; pigmentos fotossintetizantes; Saccharum; antioxidante.

### **CHAPTER 3** - Physiological response of selenium in photosynthesis, plant growth, technological quality and productivity of sugarcane

**ABSTRACT** - Selenium (Se) is a beneficial element for plants because it is able to enhance the antioxidant system, preserve the photosynthetic apparatus, increase carbohydrate biosynthesis, productivity and agricultural quality. However, the physiological responses associated with growth and technological quality of sugarcane in response to Se have not yet been studied. Furthermore, the source and recommended dose of Se as well as the critical levels of phytotoxicity are not documented. The present study aimed to characterize the beneficial and phytotoxic responses associated with the source and applied rate of selenium on the growth, productivity and quality of sugarcane using four concentrations of Se (0, 20, 40, 80, 160 g ha<sup>-1</sup>) and two sources of Se (sodium selenate and selenite). In general, the beneficial effect of Se application on sugarcane differed between the sources, being that for sodium selenate the beneficial dose was 40 g ha<sup>-1</sup> and sodium selenite was 20 g ha<sup>-1</sup>. These beneficial effects of Se are associated with the synergistic effects of Ca, Mg, K, Fe, Zn, S, Mn and B, increased pigment and photosynthetic activity, water use efficiency, growth rate, root growth and sugar accumulation. in the culms. For both sources of Se, doses above 80 g ha<sup>-1</sup> resulted in a reduction in photosynthetic pigments, photosynthetic activity, shoot and root growth, and a reduction in sugar accumulation in the culms. The results of this study clearly demonstrate the beneficial role of foliar application of Se at low concentrations and its use has the potential to increase the sustainability and productivity of sugarcane under field conditions.

**Keywords:** Abiotic stress; photosynthetic pigments; *Saccharum*; antioxidant.

## 1 INTRODUÇÃO

O selênio (Se) é considerado um elemento benéfico em doses baixas para diversas plantas cultivadas por ter capacidade de potencializar o sistema antioxidante, preservar o aparato fotossintético para aumentar a eficiência da biossíntese de carboidratos que culmina com maior produtividade e qualidade agrícola. Entretanto, o excesso de Se pode ser tóxico para plantas cujo o sintoma visual é caracterizado pela presença de clorose, necrose e morte das plantas. (Andrade et al., 2018; Lanza e Reis, 2021).

O Se apresenta concentrações muito baixas nos solos tropicais em todo o mundo com concentrações abaixo de  $0,6 \text{ mg Se kg}^{-1}$  de solo (Reis et al., 2017; Gupta e Gupta, 2000). Neste contexto, o uso de Se vem ganhando grande atenção na agricultura visando aumentar a eficiência agronômica (Mateus et al., 2021; Shalaby et al., 2021), mitigar os impactos das mudanças climáticas globais (Aqib et al., 2021; Liu et al., 2021; Saleem et al., 2021) e combater a fome oculta por Se via biofortificação de alimentos comestíveis (Lončarić et al., 2021; Luo et al., 2021; Sabatino et al., 2021; Silva et al., 2021).

Basicamente o Se tem dois grandes papéis fisiológicos benéficos descritos em plantas. O primeiro mecanismo fisiológico do Se em plantas está relacionado ao estímulo da biossíntese de pigmentos fotoprotetores. Segundo Silva et al. (2018), o Se induz a conversão de clorofila a em clorofila b. Além disso, os mesmos autores observaram aumento da biossíntese de carotenóides. A clorofila b e carotenóides são considerados pigmentos acessórios que atuam estabilizando as principais proteínas de ligação à clorofila que captam a luz e auxiliam na proteção do complexo antena (Lokstein et al., 2021), e os carotenóides, particularmente, atuam como antioxidantes não enzimáticos e aumenta o espectro de absorção de luz durante o processo fotossintético (Garcia-Caparrós et al., 2019).

Dessa forma, os relatos na literatura mostram que a aplicação de Se em baixa concentração melhora o processo fotossintético, aumentando a produção de clorofilas (Ahmad et al., 2021; Oliveira et al., 2019; Liang et al., 2019), condutância estomática (Elkelish et al., 2019a), concentração interna de  $\text{CO}_2$  (Zhang et al., 2020), fotossíntese e síntese de carboidratos (Silva et al., 2020).

O segundo mecanismo fisiológico do Se em plantas é relatado quanto ao estímulo do metabolismo antioxidante por meio do aumento da atividade da superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX) e glutathione redutase (GR) que são responsáveis por eliminar as espécies reativas de oxigênio (ERO) protegendo biomoléculas vitais, como: proteínas, lipídeos, DNA e RNA (Saeedi et al., 2021; Silva et al., 2020; Taha et al., 2021).

De acordo com Schiavon et al. (2017), a adubação com Se promove a assimilação desse elemento em selenoproteínas que estão envolvidas na eliminação de ERO do cloroplasto melhorando o sistema de transferência de elétrons do processo fotossintético das plantas (Feng et al., 2013; Fichman et al., 2018). Dentre as selenoproteínas, a glutathione peroxidase é capaz de atuar no combate às ERO promovidas pelo desequilíbrio osmótico das plantas sob estresses, como seca (Rady et al., 2020), salinidade (Karimi et al., 2020), metais pesados (Alves et al., 2020), temperatura (Malerba e Cerana, 2018) e excesso de luz (Jaiswal et al., 2018).

Diversos estudos relatou-se o efeito benéfico do Se para diversas plantas cultivadas, como tomate (Morales-Espinoza et al., 2019; Rady et al., 2020), trigo (Elkelish et al., 2019b), milho (Jiang et al., 2017), arroz (Andrade et al., 2018), pepino (Jozwiak e Politycka, 2019) e algodão (Saleem et al., 2021). Entretanto, não há relatos na literatura sobre os efeitos benéficos do Se para cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma das principais fontes renováveis para produção de biocombustível representando 40% de bioetanol (Gilani et al., 2020), além de contribuir com 80% da produção mundial de açúcar (Narayan et al., 2021). Entretanto, as respostas fisiológicas e bioquímicas associadas ao crescimento e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar em resposta ao Se ainda não foram estudadas. Além disso, não está claro qual é a fonte e dose recomendada de Se, bem como os níveis críticos de fitotoxicidade do Se em cana-de-açúcar.

Nesse sentido, estudos são necessários para elucidar as relações metabólicas, fisiológicas e do crescimento das plantas de cana-de-açúcar em resposta às fontes e doses de Se, bem como determinar os níveis de toxicidade pelo elemento. Assim, o presente estudo teve como objetivo caracterizar as respostas benéficas e fitotóxicas associadas à fonte e à taxa aplicada de selênio sobre o crescimento, produtividade e qualidade da cana-de-açúcar.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Condições de crescimento e desing experimental

O experimento de vaso foi conduzido no município de Suzanápolis, Estado de São Paulo, Brasil, com as seguintes coordenadas geográficas latitude 20°23'21.49"S e longitude 51° 1'56.21"W, e 380 m de altitude. O clima predominante da região é o Aw (Köppen), clima seco definido, temperatura média anual de 21,6 °C, umidade relativa média de 70%, e média de chuva de 1244 mm. O experimento não teve controle de umidade do ar, luminosidade e temperatura. Durante a condução do experimento foram coletados os dados climáticos da Estação local e da estação agrometeorológica da Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Ilha Solteira-SP (Figura 1). Dessa forma, foi utilizado a evapotranspiração de referência e coeficiente da cultura ( $K_c$ ) de cada estágio fenológico para calibrar turno de rega e a lâmina a ser aplicada de acordo com Marin et al. (2020).

O experimento foi delineado em blocos completos casualizados distribuídos em esquema fatorial  $2 \times 5$ , onde: cinco concentrações de Se (0, 20, 40, 80 e 160 g ha<sup>-1</sup>) e duas formulações de Se (selenato de sódio e selenito de sódio) foram aplicados via foliar aos quatro meses de idade da cana-de-açúcar, resultando em 10 tratamentos com cinco repetições de um total de 50 parcelas experimentais. Como não há descrição na literatura sobre aplicação benéfica de Se em cana-de-açúcar, as doses escolhidas foram baseadas nos resultados de nosso experimento preliminar (dados não publicados).

Em fevereiro de 2020, o solo foi coletado de uma área já corrigida com calcário, gesso e fosfato natural de acordo com Raij et al. (2001). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico e as propriedades químicas foram: selênio: indetectável; pH (CaCl<sub>2</sub> 0,01 M) 5,3; fósforo (resina): 7 mg dm<sup>-3</sup>, enxofre: 4 mg dm<sup>-3</sup> (fosfato de cálcio), boro (água quente): 0,13 mg dm<sup>-3</sup>, cobre (ácido dietileno triamina pentacético - DTPA): 0,8 mg dm<sup>-3</sup>, ferro (DTPA): 21 mg dm<sup>-3</sup>, manganês (DTPA): 22,1 mg dm<sup>-3</sup>, zinco (DTPA): 1,0 mg dm<sup>-3</sup>; potássio (resina): 4,5 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, cálcio (resina): 17 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, magnésio (resina): 7,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, H+Al (tampão SMP): 14 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>,

capacidade de troca catiônica : 42,3 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e saturação de base: 28,5% (Raij et al., 1997).

As mudas pré-brotadas da variedade RB96 6928 (Ridesa-Brasil: <https://www.ridesa.com.br/variedades>) foram transplantadas no dia 18 de maio de 2020 para vasos de polietileno com volume de 18 L, contendo solo peneirado com malha de 4 mm. A adubação com NPK de plantio foi realizada com 2,5 g vaso<sup>-1</sup> da formulação 06-30-24 de acordo com Raij et al. (2001). Aos 2 meses após o transplante (MAT) foi realizada uma aplicação foliar com 0,42 mg de B vaso<sup>-1</sup>. Aos 3 MAT foi realizada a aplicação foliar dos tratamentos contendo Se. Aos 4 MAT foi realizada adubação de cobertura com 1,25 g vaso<sup>-1</sup> do formulado 20-00-20 de acordo com Raij et al. (2001). Aos 5 MAT foi realizada aplicação foliar com 0,83 mg de B vaso<sup>-1</sup>, e aos 6 MAT foi realizada aplicação foliar com 1,24 mg de B vaso<sup>-1</sup>, usando a fonte ácido bórico de acordo com Raij et al. (2001). Não houve necessidade de realizar controle de pragas e doenças.

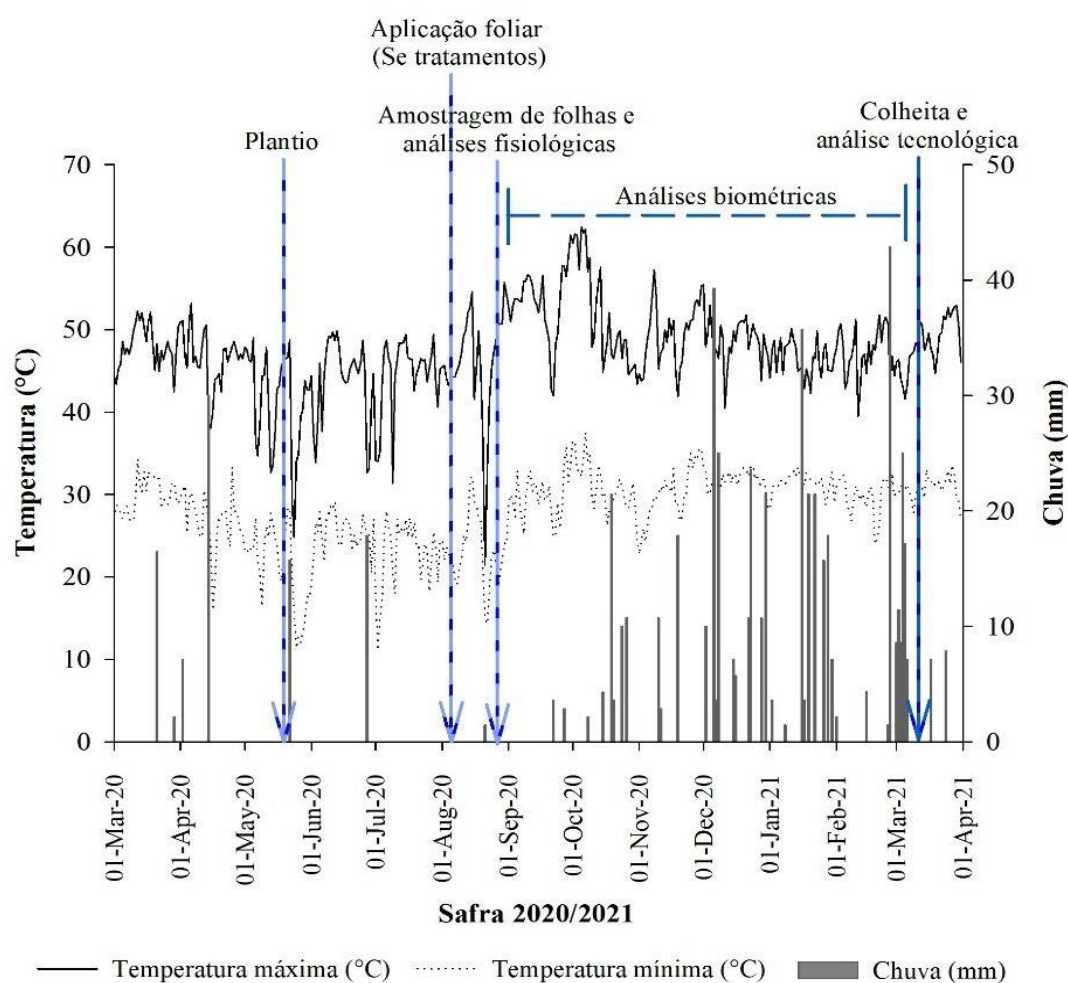


Figura 1 – Dados climáticos durante a condução do experimento.

## 2.2 Análise química foliar

O tecido vegetal das folhas+3 (folha diagnose) (Gallo et al., 1962) foi utilizado para determinar as concentrações de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e Se após digestão com ácido nítrico PA (Merch) e posterior análise por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS).

O material vegetal foi seco em estufa a  $45 \pm 5$  °C por 72 h até atingir peso constante e moído em moinho de facas de aço inoxidável Willey. Uma amostra de 0,20 g de peso seco foi colocada em recipientes de digestão com perfluoroalcoxis (PFA) com adição de 6 mL de HNO<sub>3</sub> PA 65% (Merch). A digestão foi realizada em um

sistema de micro-ondas composto por uma plataforma Multiwave GO com rotor de 12 vasos (Anton Paar, Graz, Áustria).

As configurações de digestão foram definidas como: temperatura = 195 °C, tempo = 45 min de rampa e 20 min de espera, dois recipientes contendo apenas ácido nítrico e duas réplicas de material de referência certificado (CRM) para Se foram adicionados a cada três corridas. O CRM utilizado foi o BCR 402 (trevo branco) com recuperação de Se de 97%. Após a digestão, 9 mL de água mili-Q foram adicionados a cada tubo para perfazer um volume final de 15 mL e armazenados à temperatura ambiente. Os digeridos foram diluídos para 1:5 adicionando água mili-Q antes da análise elementar. Os elementos foram analisados por ICP-MS (Agilent 7500ce, Agilent Technologies®, Tóquio-Japão) conforme descrito anteriormente por Silva et al. (2018).

### **2.3 Sintoma visual de fitotoxicidade de Se**

Após quatorze dias da aplicação foliar de Se, as folhas+3 (Gallo et al., 1962) do colmo dominante da cana-de-açúcar foram coletadas para análises e caracterização da sintomatologia de toxicidade visual de Se em cana-de-açúcar.

### **2.4 Análises de pigmentos fotossintéticos**

As determinações dos pigmentos fotossintéticos (clorofila, carotenóides e feofitina) foram baseadas na descrição de Lichtenthaler e Wellburn (1983) utilizando acetona 80% como solvente. A extração foi realizada com 0,5 g de matéria fresca em 5 mL de acetona 80%. As concentrações de clorofila total, feofitina total e carotenóides são expressas em  $\mu\text{g mL}^{-1}$ .

### **2.5 Trocas gasosas**

As avaliações das trocas gasosas foram realizadas em folhas diagnósticas (folhas+3) (Gallo et al., 1962) aos 14 dias após os tratamentos com Se usando um

analisador de gás infravermelho portátil CIRAS-3 Portable Photosynthesis System (PP Systems Inc., Amesbury, MA, EUA) em um dia claro entre 8:00 e 10:00.

A taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> expressa por área ( $A - \mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), condutância estomática ( $g_s - \text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), transpiração foliar ( $E - \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), concentração interna de CO<sub>2</sub> na câmara subestomática ( $i_c - \text{mmol CO}_2 \text{mol ar}^{-1}$ ), eficiência do uso da água (WUE; relação  $A/E - \mu\text{mol CO}_2 \text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$ ) e eficiência da carboxilação (relação  $A/i_c - \mu\text{mol CO}_2 \text{mol H}_2\text{O}^{-1}$ ) foram determinados de acordo com Silva et al. (2018).

## 2.6 Fluorescência da clorofila a

As medidas de fluorescência da clorofila a foram realizadas por um fluorômetro acoplado ao LI-6400, segundo o método de pulso saturado (Maxwell e Johnson, 2000). As avaliações foram realizadas no folha+3, das 8h00 às 10h00 (Gallo et al., 1962). Antes das análises de fluorescência, uma folha de alumínio foi colocada em cada folha selecionada por aproximadamente 20 min, a fim de manter a folha no escuro para que todo o sistema de transporte fotossintético de elétrons fosse oxidado.

Na presença de luz artificial, mediu-se a fluorescência máxima ( $F_m'$ ), fluorescência no estado de equilíbrio dinâmico ( $F'$ ) e fluorescência mínima ( $F_0'$ ); eficiência quântica potencial de FSII ( $F_v/F_m$ ); eficiência quântica da antena ( $F_v'/F_m'$ ) de acordo com descrito por Nogueira et al. (2022).

## 2.7 Crescimento de plantas e análise de rendimento

A altura de plantas foi medida aos 0, 15, 30, 60, 90 e 214 DAA da base da planta até a última inserção foliar apical do perfilho dominante, expressa em centímetros. O índice de crescimento (IC) foi calculado a partir das medidas de altura de plantas conforme descrito por Radford (1967):

$$\text{IC} = (\text{ALT})_{n+1} - (\text{ALT})_n / \text{ALT}_{n+1}$$

Onde IC = Índice de crescimento, ALT = altura de plantas, n = biometria inicial, n+1 = biometria final

Aos 214 DAA foi realizado a colheita para mensurar o número de perfilhos por vaso. Posteriormente, a massa perfilhos produzidos por vaso foi pesada com auxílio de balança analítica e expressa em quilogramas.

A seguir, foi separado a massa fresca da parte aérea (folhas+perfilhos) da raiz, onde após a limpeza das amostras elas foram levadas à estufa de ventilação forçada a 65°C por 72 h até a atingir massa constante. A massa seca da parte aérea e da raiz foi pesada com a balança analítica e expressa em quilogramas.

## **2.8 Análise tecnológica**

Aos 214 DAA, época de colheita, 10 perfilhos foram coletados para análise tecnológica por meio da avaliação dos teores de sacarose (Pol% cana), pureza, concentração de sólidos solúveis (Brix) e açúcares redutores determinados de acordo com os métodos descritos por Consecana (2006).

## **2.9 Análise estatística**

Os dados foram submetidos à ANOVA e então analisados estatisticamente significantes ao nível de 5% de probabilidade de erro. Os pressupostos do modelo foram avaliados pelo teste de Shapiro-Wilk e a homocedasticidade da variância pelo teste de Hartley. As interações entre as formulações e os teores de Se, quando significativas, foram analisadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. A análise de correlação de Pearson ( $p < 0,05$ ) também foi realizada para verificar as variáveis dependentes que se correlacionavam diretamente em relação aos tratamentos propostos. No Software R (R Development Core Team, v. 3.6), o pacote “corrplot” foi acessado para criar Heatmap, usando as funções “cor” e “cor.mtest” para criar matrizes de coeficiente e p-valor para cada formulação de Se analisados, respectivamente. A análise multivariada foi realizada por meio da Análise de Componentes Principais. Todas as análises foram realizadas por meio do software

estatístico R (R Development Core Team, V. 3.3.0+).

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Concentração de selênio e sua interação com outros elementos

Observou-se que tanto o selenato quanto o selenito de sódio promoveram aumento ( $p < 0,05$ ) progressivo na concentração de sódio e Se na folha conforme aumento das doses, sendo o selenito de sódio foi o responsável por ocasionar aumentos mais pronunciados comparado ao selenato de sódio (Figura 2A, B).

Tabela 1 - Comparação de médias da concentração de macronutrientes na folha da cana-de-açúcar.

Doses de selênio	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg <sup>-1</sup>					
0	17,09	1,57	6,85	1,31	0,51	0,55
20	16,15	1,54	7,19	1,28	0,54	0,62
40	16,27	1,55	7,76	2,24	0,66	0,71
80	20,33	1,50	7,31	2,02	0,64	0,68
160	14,70	1,60	8,38	1,96	0,69	0,72
Fontes de selênio	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg <sup>-1</sup>					
Selenato	18,24 a	1,55 a	7,14 b	1,43 b	0,53 b	0,63 b
Selenito	15,58 b	1,55 a	7,85 a	2,09 a	0,67 a	0,68 a

Letras diferentes indicam diferença entre as médias pelo teste Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Tabela 2 - Comparação de médias de micronutrientes e concentrações de Na e Se na folha da cana-de-açúcar.

Doses de selênio	B	Cu	Fe	Mn	Na	Se	Zn
	mg kg <sup>-1</sup>						
0	10,53	1,53	145,01	37,93	11,30	1,72	3,89
20	10,86	1,87	146,52	35,02	14,47	2,86	3,98
40	11,22	1,64	147,62	50,19	18,39	13,20	4,73
80	10,67	1,45	155,10	60,60	28,24	19,65	5,81
160	12,26	1,59	186,70	52,75	28,95	28,57	5,81
Fontes de selênio	B	Cu	Fe	Mn	Na	Se	Zn
	mg kg <sup>-1</sup>						
Selenato	10,95 a	1,61 a	145,51 b	46,76 b	10,50 b	11,14 b	5,16 a
Selenito	11,26 a	1,62 a	167,02 a	50,84 a	30,04 a	15,26 a	4,52 b

Letras diferentes indicam diferença entre as médias pelo teste Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Ambas as fontes resultaram na maior ( $p < 0,05$ ) concentração de sódio na folha a partir da dose de 80 g ha<sup>-1</sup> (Figura 2A). Já quanto a concentração de Se, o selenato de sódio resultou no aumento ( $p < 0,05$ ) de 27x na concentração de Se foliar na dose

de 160 g ha<sup>-1</sup> e o selenito de sódio resultou no aumento ( $p < 0,05$ ) de 12 x na concentração de Se foliar (Figura 2B). Na figura 2C, observou-se que o Se teve correlação positiva ( $p < 0,05$ ) com diversos elementos, tais como: Na, Ca, Mg, K, Fe, Zn, S, Mn e B (Tabela 1 e 2).

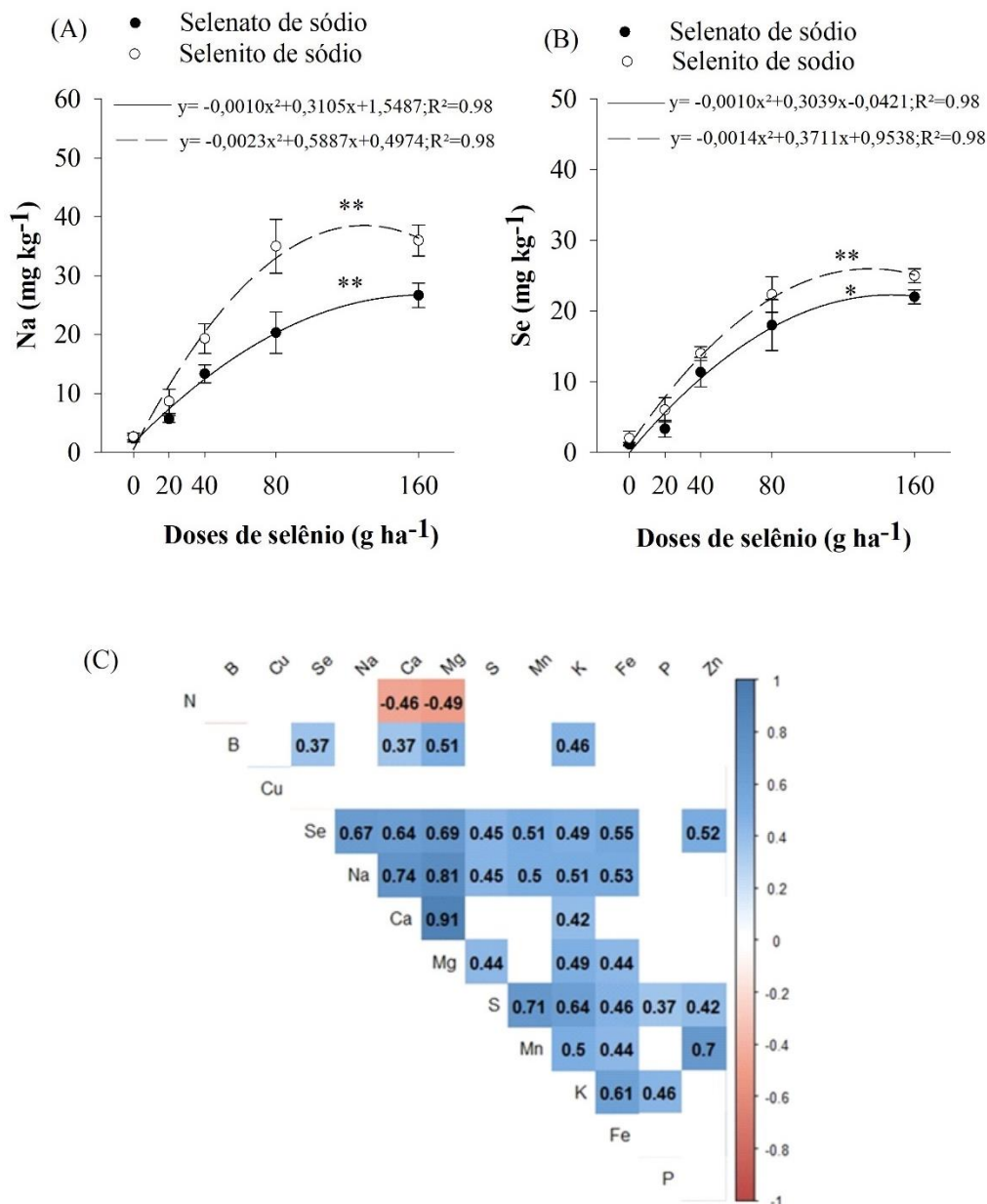


Figura 2 - Concentração de sódio (A) e selênio (B) e interação entre os elementos (C) em folhas de cana-de-açúcar em resposta à aplicação foliar de selenato e selenito de sódio. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as fontes de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as doses de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 5$  repetições). O heatmap indica as cores vermelhas correlações negativas e as cores azuis

correlações positivas, sendo que dentro do quadrante de cada interação está o coeficiente de correlação de Pearson significativo a 5% de probabilidade.

### 3.2 Parâmetros fotossintéticos e avaliação visual das folhas

O selenato de sódio a  $40 \text{ g ha}^{-1}$  promoveu efeito benéfico visual no teor de verde da folha (Figura 3A), corroborado pelo aumento ( $p < 0,05$ ) de 86%, 79% e 61% na concentração de clorofila a, clorofila b e clorofila total, respectivamente (Figura 4A-C). Entretanto, as doses de 80 e  $160 \text{ g ha}^{-1}$  de selenato de sódio ocasionaram redução na concentração dos pigmentos fotossintetizantes (Figura 4A-C), promovendo sintoma visual de clorose e necrose no limbo foliar (Figura 3A).

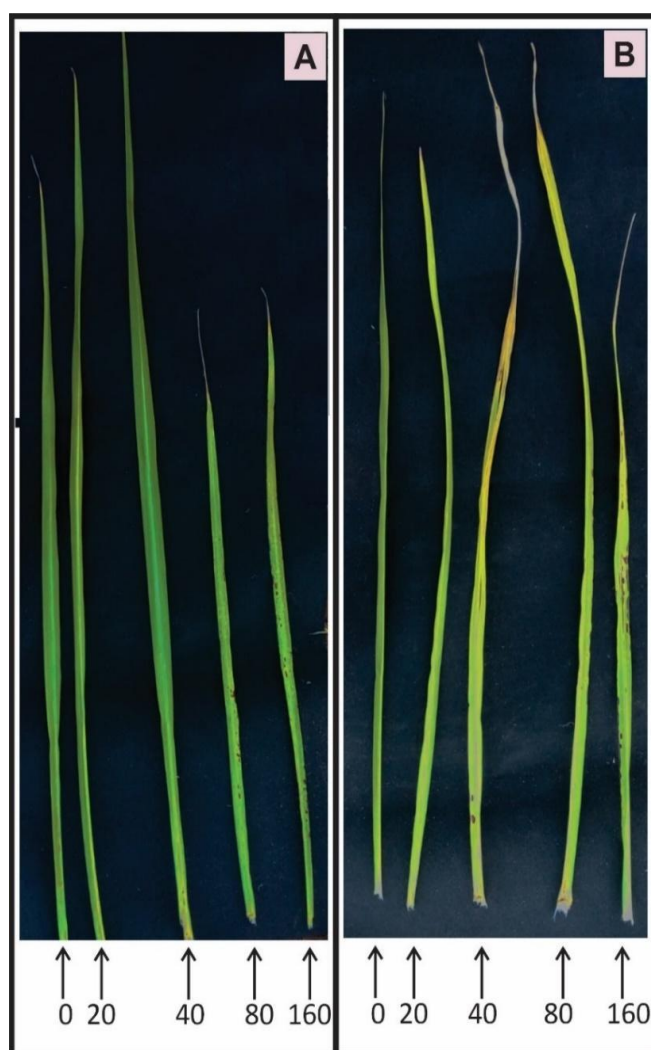


Figura 3 - Caracterização visual de sintomas benéficos e de toxidez das folhas de cana-de-açúcar em resposta à aplicação foliar de selenato (A) e selenito de sódio (B).

O selenito de sódio não ocasionou efeito benéfico visual na intensidade do verde da folha (Figura 3B), porém foi observado que a dose de 40 g ha<sup>-1</sup> resultou no aumento ( $p < 0,05$ ) de 56%, 55% e 61% na concentração de clorofila a, clorofila b e clorofila total, respectivamente (Figura 4A-C). Por outro lado, a dose de 80 g ha<sup>-1</sup> de selenito de sódio ocasionou redução ( $p < 0,05$ ) da concentração de clorofila a, e a dose de 160 g ha<sup>-1</sup> promoveu redução da concentração de clorofila a, clorofila b, clorofila total e carotenoides (Figura 4A-D), resultando no sintoma visual de clorose e necrose foliar das plantas (Figura 3B).

A concentração de carotenoides na folha foi aumentada ( $p < 0,05$ ) em 25% a dose de 40 g ha<sup>-1</sup> de selenato de sódio, enquanto os tratamentos com selenito de sódio não promoveram aumento ( $p > 0,05$ ) na concentração de carotenoides em cana-de-açúcar (Figura 4D).

As aplicações de selenato e selenito de sódio ambos aumentaram ( $p < 0,05$ ) a concentração de feofitina a, obtendo maior incremento de 64% utilizando selenato de sódio e 27% utilizando selenito de sódio ambas a 160 g ha<sup>-1</sup> (Figura 4E). Tanto o selenato quanto o selenito de sódio com dose de 160 g ha<sup>-1</sup> promoveu aumento ( $p < 0,05$ ) de feofitina total nas folhas em 37% para selenato de sódio e 28% para selenito de sódio (Figura 4F).

A fonte de selenato de sódio a dose 40 g ha<sup>-1</sup> foi capaz de aumentar ( $p < 0,01$ ) a taxa fotossintética em 469% (Figura 5A), concentração de CO<sub>2</sub> interno em 41% (Figura 5D) eficiência da carboxilação em 580% (Figura 5E) e eficiência do uso da água em 350% (Figura 5F). Por outro lado, a fonte selenito de sódio resultou na maior ( $p < 0,01$ ) taxa fotossintética em 322% (Figura 5A), concentração de CO<sub>2</sub> interno em 35% (Figura 5D) e eficiência do uso da água em 412% (Figura 5F) nas plantas tratadas com a dose de 20 g ha<sup>-1</sup>.

A condutância estomática teve maior aumento ( $p < 0,01$ ) utilizando a dose de 40 g ha<sup>-1</sup> de selenato e selenito de sódio com aumento de 271% e 237%, respectivamente (Figura 5B). Quanto a eficiência de carboxilação utilizando a fonte de selenito de sódio apresentou maior aumento ( $p < 0,01$ ) com a dose de 80 g ha<sup>-1</sup>. A taxa de transpiração não apresentou alterações ( $p > 0,01$ ) em razão dos tratamentos com selenato e selenito de sódio (Figura 5C).

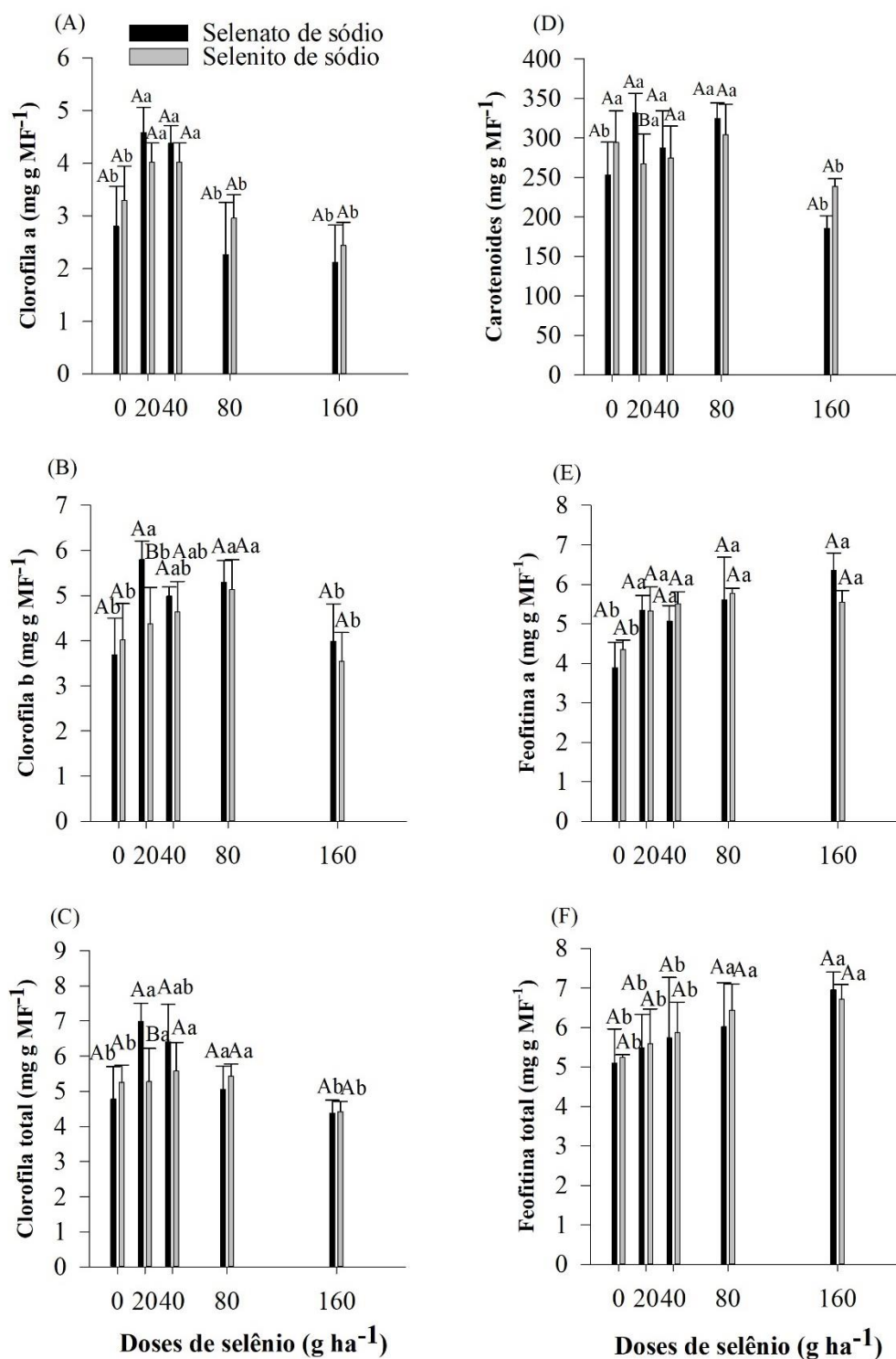


Figura 4 - Concentração de clorofila a (A), clorofila b (B), clorofila total (C), carotenoides (D), feofitina a (E) e feofitina total (F) em folhas de cana-de-açúcar em resposta à aplicação foliar de selenato e selenito de sódio. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as fontes de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença

significativa entre as doses de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 5$  repetições).

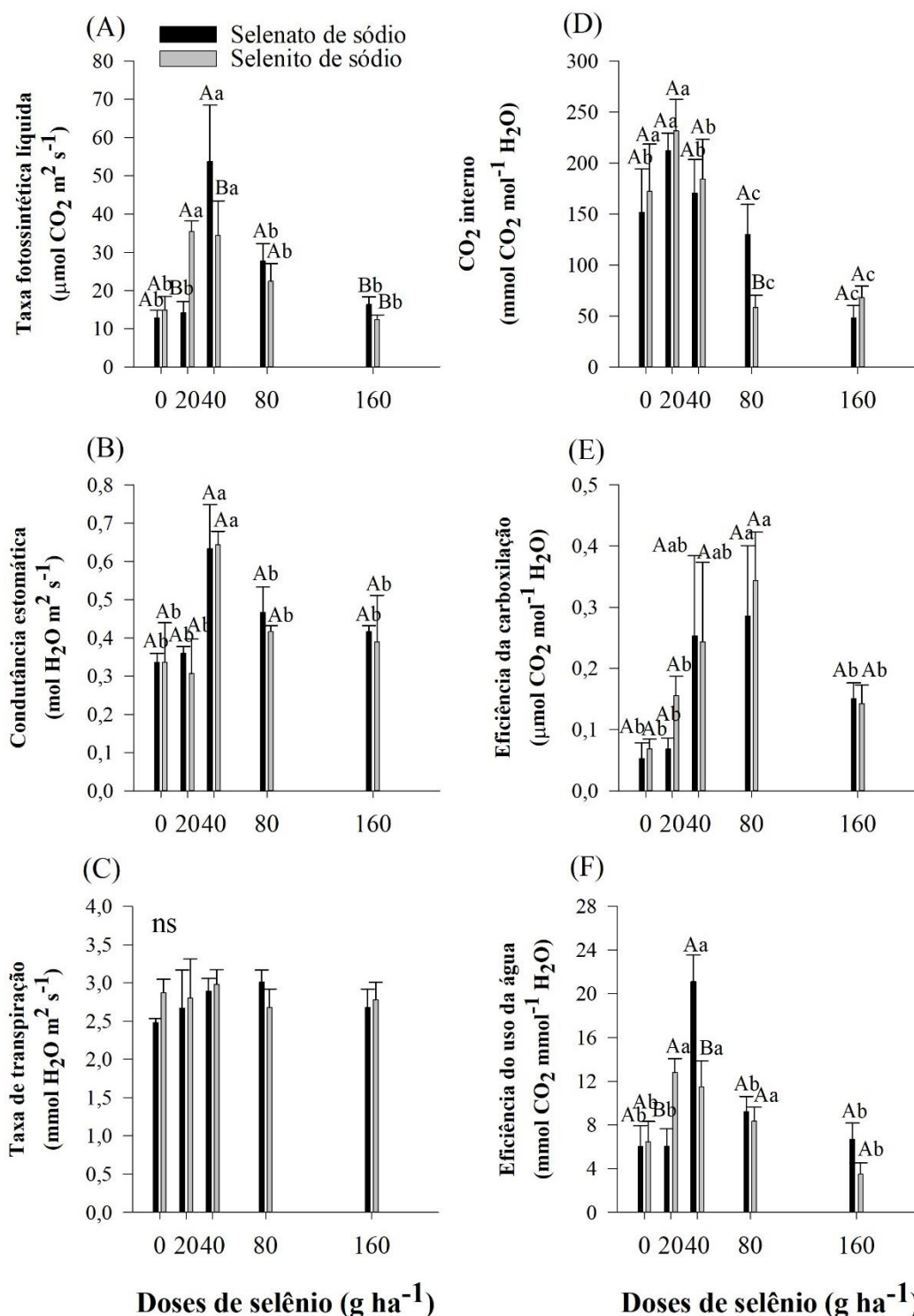


Figura 5 - Taxa fotossintética (a), condutância estomática (b), taxa de transpiração (d), carbono interno (d), eficiência da carboxilação (e) e eficiência do uso da água em cana-de-açúcar em resposta à aplicação foliar de selenato e selenito de sódio. Letras

maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as fontes de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as doses de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 5$  repetições).

A fluorescência inicial (F0), fluorescência máxima (Fm), fluorescência variável (Fv), rendimento quântico máximo do fotossistema II (Fv/Fm) e eficiência quântica efetiva do fotossistema II (Fv/F0) não foram influenciadas ( $p > 0,05$ ) pelos tratamentos utilizados (Figura 6).

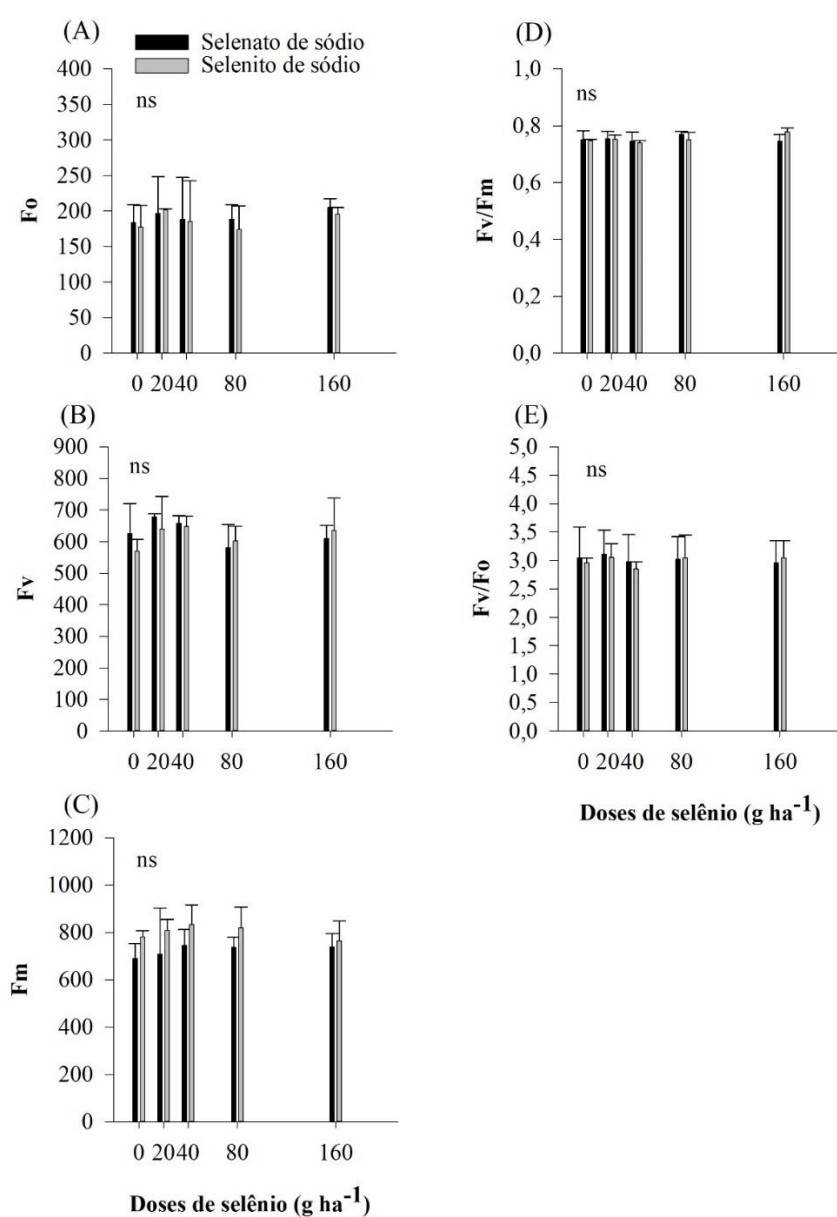


Figura 6 - F0 - fluorescência inicial (a), Fv - fluorescência variável (b), Fm - fluorescência máxima (c), Fv/Fm - rendimento quântico máximo do fotossistema II (d) e Fv/F0 - eficiência quântica efetiva do fotossistema II (e).

eficiência quântica efetiva do fotossistema II ( $F_v/F_0$ ) em cana-de-açúcar em resposta à aplicação foliar de selenato e selenito de sódio. N.s. – Não significativo pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 5$  repetições).

### 3.3 Crescimento vegetal

Houve incremento dos índices de crescimento temporal das plantas de cana-de-açúcar em resposta as fontes selenato de sódio (Figura 6A) e selenito de sódio (Figura 6B). Observa-se que em ambas as fontes de selênio, a dose  $20 \text{ g ha}^{-1}$  promoveu índice de crescimento mais acelerado ( $p < 0,01$ ) a partir dos seis meses de idade, sendo que as doses acima de  $20 \text{ g ha}^{-1}$  reduziram o índice de crescimento das plantas aos seis meses de idade (Figura 6C).

As plantas tratadas com a dose de  $20 \text{ g ha}^{-1}$  de selenato e selenito de sódio continuou a apresentar maior ( $p < 0,01$ ) índice de crescimento ao final dos dez meses de idade (Figura 6A e 6B), aumentando o índice de crescimento em 107% e 116%, respectivamente (Figura 6C).

A massa seca da parte aérea e a massa de perfilhos da cana-de-açúcar reduziram ( $p < 0,05$ ) apenas quando as plantas foram tratadas com doses a partir de  $80 \text{ g ha}^{-1}$  de selenito de sódio (Figura 7A e 7D), sendo que o número de perfilhos não sofreu alterações ( $p > 0,05$ ) em razão dos tratamentos utilizados (Figura 7C).

A massa seca de raiz foi aumentada ( $p < 0,05$ ) a uma dose de  $40 \text{ g ha}^{-1}$  em 200% utilizando a fonte selenato de sódio e em 157% utilizando a fonte de selenito de sódio (Figura 7B).

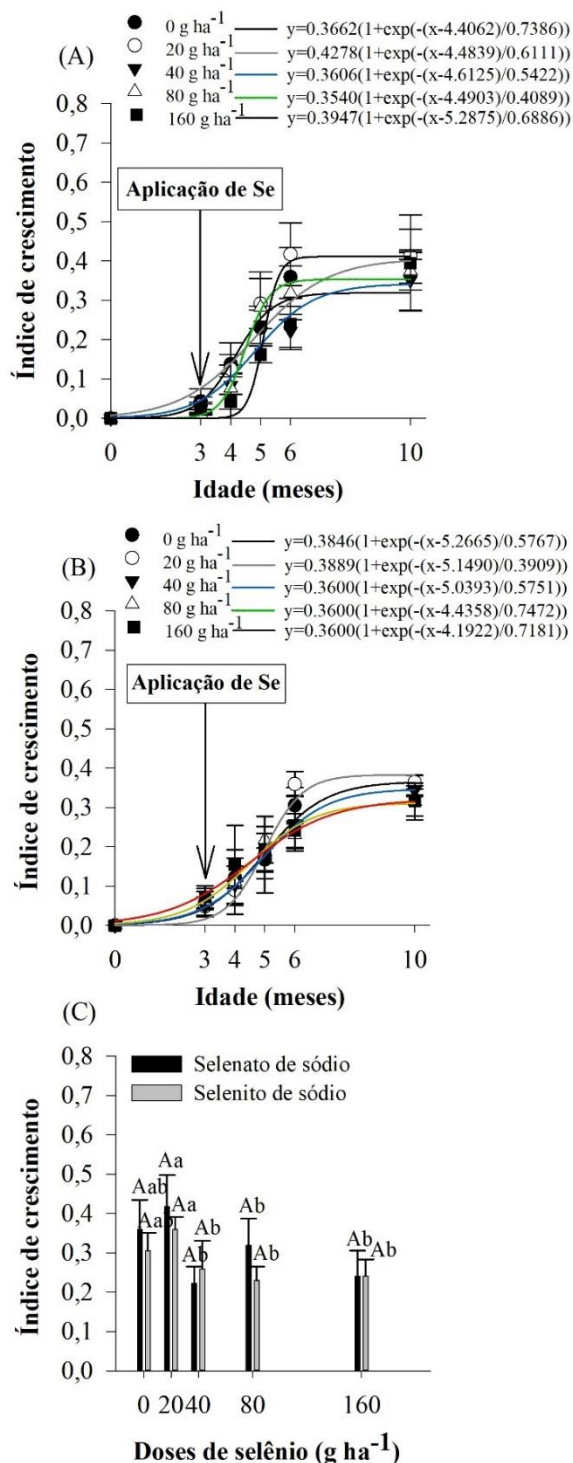


Figura 7 - Índice de crescimento temporal da cana-de-açúcar em resposta a doses de selenato de sódio (A), índice de crescimento temporal da cana-de-açúcar em resposta a doses de selenito de sódio (A), índice de crescimento da cana-de-açúcar em resposta a doses de selenato e selenito de sódio aos seis meses de idade (C). Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as fontes de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que

não há diferença significativa entre as doses de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 5$  repetições).

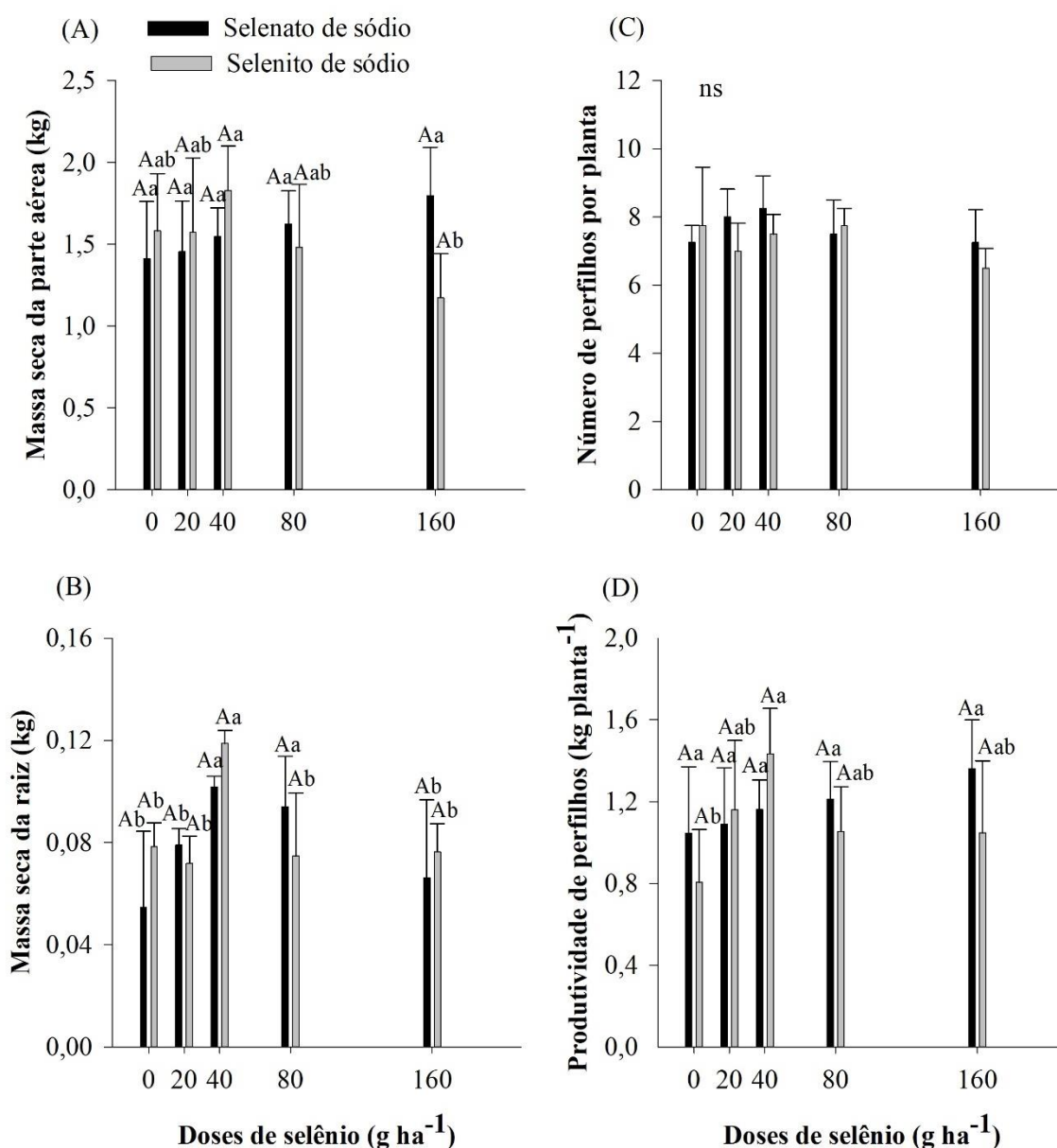


Figura 8 - Massa seca da parte aérea (A), massa seca da raiz (B), número de perfilhos por planta (C) e rendimento de perfilhos por planta (D) de em cana-de-açúcar em resposta à aplicação foliar de selenato e selenito de sodio. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as fontes de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as doses de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 5$  repetições).

### 3.4 Análise tecnológica da cana-de-açúcar

Observou-se que utilizando a fonte selenato de sódio na dose de 40 g ha<sup>-1</sup> houve incremento ( $p < 0,01$ ) de 109% de pol (Figura 8A), 107% na pureza (Figura 8B), 108% no grau de açúcares solúveis (Figura 8C) e redução de 8% nos açúcares redutores (Figura 8D). Por outro lado, utilizando selenito de sódio a uma dose de 20 g ha<sup>-1</sup> houve aumento ( $p < 0,01$ ) nas porcentagens de pol em 108% (Figura 8A) e pureza em 101% (Figura 8B), acarretando redução de 11% nos açúcares redutores (Figura 8D). O grau de açúcares solúveis (Figura 8C) não foi influenciado ( $p > 0,05$ ) pela aplicação com selenito de sódio.

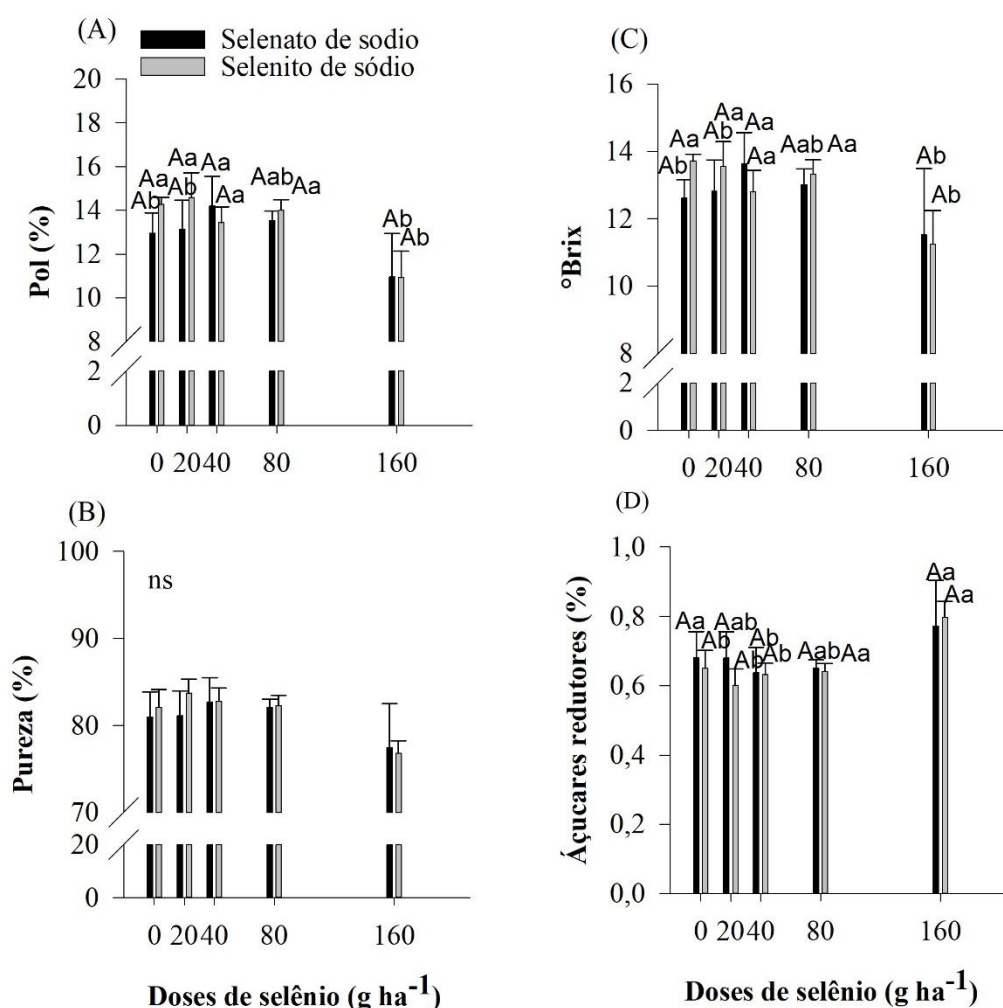


Figura 9 - Pol% (a), pureza% (b), açúcares solúveis (c) e açúcares redutores nos colmos de cana-de-açúcar em resposta à aplicação foliar de selenato e selenito de sodio. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as fontes de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as doses de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 5$  repetições).

A maior dose de selenato e selenito provocou aumento ( $p < 0.05$ ) em 17% e 26% dos açúcares redutores, respectivamente (Figura 7D).

### 3.5 Análise de componentes principais

Na Figura 10 evidencia os principais conjuntos de resposta às doses de selenato de sódio em cana-de-açúcar. Observa-se que o tratamento com 40 g ha<sup>-1</sup> de selenato tem maior conjunto de correlações positivas para variáveis de crescimento, fisiológicas e qualidade tecnológica, como taxa fotossintética, condutância estomática, concentração de carbono interno, taxa de respiração, eficiência de carboxilação, clorofila a, clorofila b, clorofila total, feofitina a, número de perfilhos e massa seca da raiz. Por outro lado, observa-se a dose de 160 g ha<sup>-1</sup> de selenato de sódio correlacionou com variável relacionada a baixa qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, como o aumento de açúcares redutores no caldo (Figura 10).

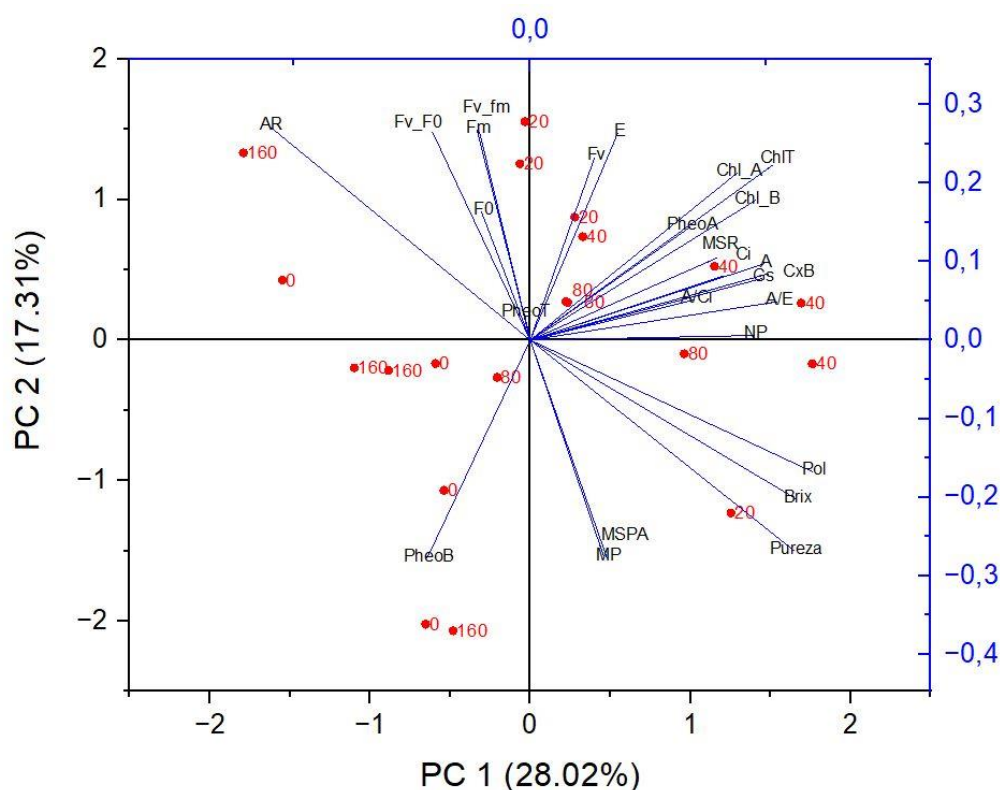


Figura 10 – Análise de componentes principais das doses de selenito de sódio com variáveis de crescimento, fotossíntese e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. F0



respiração;  $G_s$  – condutância estomática;  $C_i$  – carbono interno;  $A/E$  – eficiência do uso da água;  $A/C_i$  – eficiência de carboxilação; MSPA – massa seca da parte aérea; MSR – massa seca da raiz; MP – massa de perfilhos; NP – número de perfilhos; AR – açúcar redutor.

Por outro lado, observa-se a dose de  $160 \text{ g ha}^{-1}$  de selenito de sódio correlacionou com variável relacionada a baixa qualidade tecnológica da cana-de-açúcar e danos na fotossíntese, como o aumento de açúcares redutores no caldo, feofitina b, fluorescência variável; rendimento quântico máximo do e rendimento máximo não fotoquímico (Figura 11).

#### 4. DISCUSSÃO

Os resultados desse estudo demonstraram claramente o papel benéfico do Se para aumento da concentração de pigmentos fotossintéticos, atividade fotossintética, eficiência do uso da água, índice de crescimento das plantas e acúmulo de açúcar nos colmos de cana-de-açúcar. Foi nítido observar que a cana-de-açúcar tem capacidade de absorver Se conforme aumento da dosagem de selenato e selenito de sódio (Figura 2B). O papel benéfico do Se não está relacionado apenas aos efeitos na fisiologia da planta, mas também em relações sinérgicas com outros elementos essenciais, tais como: Ca, Mg, K, Fe, Zn, S, Mn e B aumentando a eficiência do uso de nutrientes pela planta (Figura 2C e Tabela suplementar 1-6). Zhou et al. (2020), também observaram efeitos benéficos do Se na disponibilidade de outros elementos, o que muitas vezes refletem em maior produtividade e qualidade agrícola.

Visualmente, pode-se notar que a aplicação foliar de selenato de sódio e selenito de sódio até  $40 \text{ g ha}^{-1}$  resultou no maior teor de verde da folha, porém doses maiores resultaram em clorose e necrose foliar decorrentes de efeitos fitotóxicos do Se (Figura 3). A biossíntese de pigmentos fotossintéticos é facilmente alterada por fatores bióticos e abióticos em cana-de-açúcar, sendo os principais fatores, como: nutrição (Bassi et al., 2018), pragas (Dinardo-Miranda et al., 2014), doenças (Bagyalakshmi et al., 2019), luz (Marchiori et al., 2014), temperatura (Elsheery et al., 2020; Kohila e Gomathi, 2018) e regime hídrico (Zhang et al., 2020). Nesse sentido, o presente estudo mostrou que o Se aplicado a uma taxa de 20 a  $40 \text{ g ha}^{-1}$  nas formas

de selenato e selenito de sódio forneceu um aumento notável nas concentrações de clorofila a, clorofila b, clorofila total e concentração de carotenoides (Figura 4 A-D).

Existem relatos de que a aplicação de Se, em baixas concentrações, induz plantas de feijão-caupi a converter clorofila a em clorofila b, e promove aumento na concentração de carotenoides e feofitina nas folhas (Silva et al., 2020). A clorofila b e carotenoides são considerados pigmentos acessórios que atuam estabilizando as principais proteínas de ligação à clorofila que captam a luz e auxiliam na proteção do complexo antena (Lokstein et al., 2021). No presente trabalho, observou-se aumento de todos os pigmentos fotossintéticos em cana-de-açúcar, conforme observado para clorofila a, clorofila b, clorofila total e concentração de carotenoides (Figura 4 A-D). Esses resultados mostram que o Se teve papel de aumentar os pigmentos fotoprotetores e a clorofila a em cana-de-açúcar (Figura 4 A-D), pois segundo Feng et al. (2013) e Pennanen et al. (2002) o Se pode atuar reparando cloroplastos danificados pelo estresse ambiental, além de proteger as enzimas cloroplastídicas do complexo antena.

A aplicação de Se nas formas de selenato e selenito de sódio a partir da dose de 20 g ha<sup>-1</sup> aumentou a concentração de feofitina a nas folhas de cana-de-açúcar (Figura 4 E), sendo esse um pigmento fotossintético que tem função de remover o oxigênio no estado singleto (fitotóxico) do centro de reação, protegendo o fotossistema II contra o dano fotoinduzido (Mezacasa et al., 2020). Além disso, o selênio pode ter função de melhorar a eficiência da transferência de elétrons entre os fotossistemas, uma vez que a feofitina a também tem papel essencial para a transferência de elétrons no 'esquema z' da fase fotoquímica da fotossíntese (Hou, 2014).

Vários trabalhos mostram que os efeitos combinados do aumento da biossíntese de pigmentos fotoprotetores e o estímulo do metabolismo antioxidante induzido pela aplicação de Se nas plantas são os principais mecanismos fisiológicos para aumentar o desempenho fotossintético das plantas cultivadas (Feng et al., 2013; Lanza e Reis, 2021; Silva et al., 2020). Segundo Lanza et al. (2021), a aplicação de Se, em baixas concentrações, aumenta a atividade fotossintética e trocas gasosas das plantas, principalmente devido ao incremento da proteção do complexo antena. Os resultados desse estudo mostram aumento da atividade fotossintética da cana-de-açúcar quando tratadas com Se nas formas de selenato a uma dose de 40 g ha<sup>-1</sup> e

selenito de sódio a uma dose de 20 g ha<sup>-1</sup>, como pode ser observado na taxa fotossintética, condutância estomática, concentração de CO<sub>2</sub> interno e eficiência do uso da água (Figura 5).

Essa proteção ocorre devido o papel do Se no aumento dos pigmentos fotoprotetores (Figura 4) e estímulo do sistema de proteção enzimático e não-enzimático contra EROS (Mateus et al., 2021; Rady et al., 2021; Schiavon et al., 2017). As EROS como o ânion superóxido, peróxido de hidrogênio, radical livre hidroxila, oxigênio singleto e radical metil são substâncias sintetizadas normalmente no metabolismo vegetal, porém em condições de estresses ambientais podem ocasionar estresse oxidativo pela elevação anormal de EROS que degradam proteínas, lipídeos, RNA e DNA até provocar a morte celular (Feng et al., 2013). De acordo com Silva et al. (2020), o Se promove quatro estratégias nas plantas para mitigar o estresse oxidativo: 1) Regulação das EROS pela dismutação, (2) regulação de sistemas antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos, (3) extinção direta de EROS por meio de compostos contendo Se e (4) regulação de complexos fotossintéticos.

O presente estudo evidenciou que o Se nas formas de selenato na dose de 40 g ha<sup>-1</sup> e selenito de sódio na dose de 20 g ha<sup>-1</sup> aumentou a eficiência do uso da água em plantas de cana-de-açúcar (Figura 5F). Vários trabalhos mostraram que o Se atua no aumento da tolerância a seca em plantas cultivadas, pois o Se estimula a produção de osmólitos compatíveis (sacarose, prolina, e.g) e o sistema antioxidante de defesa das plantas que aumenta a eficiência do uso da água (Ahmad et al., 2021; Rady et al., 2020; Zahedi et al., 2020). Sabe-se que a eficiência do uso da água é um parâmetro fisiológico muito importante que indica que a cultura é capaz de mitigar o impacto da restrição hídrica devido a sua habilidade de conservar água e manter o funcionamento metabólico ativo mesmo sob baixo potencial (Feng et al., 2017).

O presente estudo, o Se nas formas de selenato e selenito de sódio não alterou a produtividade de cana-de-açúcar, como pode ser observado no número de perfilhos e massa seca de perfilhos (Figura 8C e 8D), porém a dose de 20 g ha<sup>-1</sup> de selenato e selenito de sódio resultou em aumento da velocidade de crescimento das plantas, principalmente após os 6 meses de idade da cultura, sendo que ao final do ciclo o índice de crescimento dos tratamentos se igualou (Figura 7). O crescimento mais acelerado é uma característica desejável para a cana-de-açúcar, uma vez que o

crescimento do dossel evita a germinação de espécies de plantas daninhas fotoblásticas positivas que podem aumentar a necessidade de controle químico com herbicidas de pós-emergência (Qamar et al., 2021; Sharpe e Boyd, 2019).

Sintomas de fitotoxicidade nas plantas na dose de 160 g ha<sup>-1</sup> Se na forma de selenito de sódio resultaram em redução da massa seca da parte aérea (Figura 8A). Estudos da literatura mostram que as plantas são mais sensíveis quando tratadas com a fonte selenito de sódio, pois o selenito de sódio tem menor mobilidade dentro da planta devido a rápida transformação do Se em formas orgânicas como selenocisteína e selenometionina (Oliveira et al., 2019). No presente trabalho, foi possível notar que a fonte selenito de sódio resultou no maior aumento de sódio no tecido foliar, o que caracteriza essa fonte como mais nociva para as plantas devido aos efeitos de superdose associados ao estresse salino (Figura 2A). Por isso, o selenito de sódio apresenta maior toxidez em concentrações mais altas, podendo interferir diretamente no metabolismo vegetal, causando clorose, necrose, degradação da membrana celular, senescência e redução do crescimento das plantas (Cabral Gouveia et al., 2020; Mateus et al., 2021; Mostofa et al., 2017; Reis et al., 2020; Ribeiro et al., 2016). A Figura 3 mostra efeitos com sintomas fitotóxicos mais severos no tratamento com selenito de sódio comparado ao selenato de sódio em cana-de-açúcar. Entretanto, em doses baixas, o selenito de sódio tem efeito benéfico para diversas plantas cultivadas, como tomate (Morales-Espinoza et al., 2019; Rady et al., 2020), trigo (Elkelish et al., 2019b), milho (Jiang et al., 2017), arroz (Andrade et al., 2018), pepino (Jozwiak e Politycka, 2019) e algodão (Saleem et al., 2021). Tais efeitos benéficos estão associados ao aumento da fotossíntese, nutrição vegetal, crescimento e produtividade das culturas (Lanza e Reis, 2021).

Neste contexto, o presente trabalho mostra claramente o efeito benéfico do Se aplicado em baixas concentrações sobre a concentração de pigmentos fotossintéticos (Figura 4), atividade fotossintética (Figura 5A) e eficiência do uso da água (Figura 5F) que gerou uma condição ideal para fornecimento de energia para estímulo do crescimento da cana-de-açúcar (Figura 7 e 8) e produção de esqueletos de carbono extras que aumentou a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, como pode ser observado nos resultados de pol, pureza, açúcar solúvel e açúcares redutores (Figura 9). A sacarose é a principal forma de carbono na qual o carbono assimilado nas folhas

é transportado para os drenos da cana-de-açúcar (Ma et al., 2020). Vários trabalhos na literatura mostram que existe uma estreita coordenação da atividade fotossintética das folhas (órgãos fonte) com a demanda de carbono dos drenos (colmo) em cana-de-açúcar (Marquardt et al., 2021; Wang et al., 2013), onde o aumento da atividade fotossintética da cana-de-açúcar em resposta ao tratamento com Se modulou o carregamento, transporte e descarregamento de sacarose para os colmos atingindo melhor qualidade tecnológica da matéria prima ao final do ciclo da cana-de-açúcar.

## **5. CONCLUSÃO**

O efeito benéfico da aplicação de Se em cana-de-açúcar diferiu entre as fontes, sendo que para selenato de sódio a dose benéfica foi de 40 g ha<sup>-1</sup> e selenito de sódio foi a 20 g ha<sup>-1</sup>. A dose benéfica proporcionou um aumento na concentração total de pigmentos fotossintéticos. Além disso, a dose benéfica de Se também aumentou a taxa fotossintética, concentração de CO<sub>2</sub> interno, eficiência da carboxilação e eficiência do uso da água. A combinação do estímulo da produção de pigmentos fotossintéticos, maior eficiência do uso da água e crescimento do sistema radicular também foi observado aumento da qualidade tecnológica nos colmos da cana-de-açúcar tratada com Se benéfico.

A dose de 160 g ha<sup>-1</sup> como selenato e selenito de sódio provocou sintomas de fitotoxicidade com redução de pigmentos fotossintéticos, crescimento da raiz e parte aérea, e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar.

## 6. REFERÊNCIAS

Ahmad Z, Anjum S, Skalicky M, Waraich EA, Tariq RMS, Ayub MA, Hossain A, Hassan MM, Brestic M, Islam MS, Habib-Ur-rahman M, Wasaya A, Iqbal MA, El Sabagh A (2021) Selenium alleviates the adverse effect of drought in oilseed crops camelina (*Camelina sativa* L.) and canola (*brassica napus* L.). **Molecules** 26. <https://doi.org/10.3390/molecules26061699>

Alves LR, Prado ER, de Oliveira R, Santos EF, Lemos de Souza I, dos Reis AR, Azevedo RA, Gratão PL (2020) Mechanisms of cadmium-stress avoidance by selenium in tomato plants. **Ecotoxicology** 29:594–606. <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02208-1>

Andrade FR, da Silva GN, Guimarães KC, Barreto HBF, de Souza KRD, Guilherme LRG, Faquin V, Reis AR dos (2018) Selenium protects rice plants from water deficit stress. **Ecotoxicology Environmental Safety** 164:562–570. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.022>

Aqib M, Nawaz F, Majeed S, Ghaffar A, Ahmad KS, Shehzad MA, Tahir MN, Aurangzaib M, Javeed HMR, Habib-ur-Rahman M, Usmani MM (2021) Physiological insights into sulfate and selenium interaction to improve drought tolerance in mung bean. **Physiology Molecular Biology Plants** 27:1073–1087. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-00992-6>

Ashwin Narayan J, Chakravarthi M, Nerkar G, Manoj VM, Dharshini S, Subramonian N, Premachandran MN, Arun Kumar R, Krishna Surendar K, Hemaprabha G, Ram B, Appunu C (2021) Overexpression of expansin EaEXPA1, a cell wall loosening protein enhances drought tolerance in sugarcane. **Industrial Crops Production** 159:113035. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113035>

Bagyalakshmi K, Viswanathan R, Ravichandran V (2019) Impact of the viruses associated with mosaic and yellow leaf disease on varietal degeneration in sugarcane. **Phytoparasitica** 47:591–604. <https://doi.org/10.1007/s12600-019-00747-w>

Bassi D, Menossi M, Mattiello L (2018) Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. **Scientific Report** 8:1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20653-1>

Cabral Gouveia GC, Galindo FS, Dantas Bereta Lanza MG, Caroline da Rocha Silva A, Pereira de Brito Mateus M, Souza da Silva M, Rimoldi Tavanti RF, Tavanti TR, Lavres J, Reis AR dos (2020) Selenium toxicity stress-induced phenotypical, biochemical and physiological responses in rice plants: Characterization of symptoms and plant metabolic adjustment. **Ecotoxicology Environmental Safety** 202. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110916>

Carcia-Caparrós P, Hasanuzzaman M, Lao M (2019) Oxidative stress and antioxidant defense in plants under drought conditions. **Plant Abiotic Stress Tolerance Agronomy Molecular Biotechnology Approaches** 1:207–219. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0_9)

Oliveira VC, Faquin V, Andrade FR, Carneiro JP, da Silva Júnior EC, de Souza KRD, Pereira J, Guilherme LRG (2019) Physiological and Physicochemical Responses of Potato to Selenium Biofortification in Tropical Soil. **Potato Research** 62:315–331. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-9413-8>

Consecana. **Manual de Instruções**. (2006). Piracicaba: Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo, 5. Ed., 111 p.

Dinardo-Miranda LL, da Costa VP, Fracasso J V., Perecin D, de Oliveira MC, Izeppi TS, Lopes DOP (2014) Resistance of Sugarcane Cultivars to *Mahanarva fimbriolata* (Stål) (Hemiptera: Cercopidae). **Neotropical Entomology** 43:90–95. <https://doi.org/10.1007/s13744-013-0182-9>

Reis AR, El-Ramady H, Santos EF, Gratão PL, Schomburg L (2017) Overview of Selenium Deficiency and Toxicity Worldwide: Affected Areas, Selenium-Related Health Issues, and Case Studies. **Plant Ecophysiology** 11:209–230. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56249-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56249-0_13)

Elkelish AA, Soliman MH, Alhaithloul HA, El-Esawi MA (2019a) Selenium protects wheat seedlings against salt stress-mediated oxidative damage by up-regulating antioxidants and osmolytes metabolism. **Plant Physiology Biochemistry** 137:144–153. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.02.004>

Elkelish AA, Soliman MH, Alhaithloul HA, El-Esawi MA (2019b) Selenium protects wheat seedlings against salt stress-mediated oxidative damage by up-

regulating antioxidants and osmolytes metabolism. **Plant Physiology Biochemistry** 137:144–153. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.02.004>

Elsheery NI, Sunoj VSJ, Wen Y, Zhu JJ, Muralidharan G, Cao KF (2020) Foliar application of nanoparticles mitigates the chilling effect on photosynthesis and photoprotection in sugarcane. **Plant Physiology Biochemistry** 149:50–60. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.035>

Feng R, Wei C, Tu S (2013) The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. **Environmental Experimental Botany** 87:58–68. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.09.002>

Feng S, Gu S, Zhang H, Wang D (2017) Root vertical distribution is important to improve water use efficiency and grain yield of wheat. **Field Crops Research** 214:131–141. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.007>

Fichman Y, Koncz Z, Reznik N, Miller G, Szabados L, Kramer K, Nakagami H, Fromm H, Koncz C, Zilberstein A (2018) SELENOPROTEIN O is a chloroplast protein involved in ROS scavenging and its absence increases dehydration tolerance in *Arabidopsis thaliana*. **Plant Science** 270:278–291. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.02.023>

Gilani H, Sahebi H, Oliveira F (2020) Sustainable sugarcane-to-bioethanol supply chain network design: A robust possibilistic programming model. **Applied Energy** 278:115653. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115653>

Gupta UC, Gupta SC (2000) Selenium in soils and crops, its deficiencies in livestock and humans: Implications for management. **Communication Soil Science Plant Analysis** 31:1791–1807. <https://doi.org/10.1080/00103620009370538>

Hou HJM (2014) Unidirectional photodamage of pheophytin in photosynthesis. **Frontiers Plant Science** 4:1–5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00554>

Jaiswal SK, Prakash R, Skalny A V., Skalnaya MG, Grabeklis AR, Skalnaya AA, Tinkov AA, Zhang F, Guo X, Prakash NT (2018) Synergistic effect of selenium and UV-B radiation in enhancing antioxidant level of wheatgrass grown from selenium rich wheat. **Journal Food Biochemistry** 42:1–12. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12577>

Jiang C, Zu C, Lu D, Zheng Q, Shen J, Wang H, Li D (2017) Effect of exogenous selenium supply on photosynthesis, Na<sup>+</sup> accumulation and antioxidative capacity of

maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. **Scientific Report** 7:1–14. <https://doi.org/10.1038/srep42039>

Jozwiak W, Politycka B (2019) Effect of Selenium on Alleviating Oxidative Stress Caused by a Water Deficit in Cucumber Roots. **Plants** 8:1–18

Karimi R, Ghabooli M, Rahimi J, Amerian M (2020) Effects of foliar selenium application on some physiological and phytochemical parameters of *Vitis vinifera* L. cv. Sultana under salt stress. **Journal Plant Nutrition** 43:2226–2242. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1766072>

Kohila S, Gomathi R (2018) Adaptive physiological and biochemical response of sugarcane genotypes to high-temperature stress. **Indian Journal Plant Physiology** 23:245–260. <https://doi.org/10.1007/s40502-018-0363-y>

Lanza MGDB, Reis AR dos (2021) Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. **Plant Physiology Biochemistry** 164:27–43. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.026>

Liang Y, Su Y, Li L, Huang X, Panhwar FH, Zheng T, Tang Z, Ei HH, Farooq MU, Zeng R, Zhang Y, Ye X, Jia X, Zheng L, Zhu J (2019) Quick selenium accumulation in the selenium-rich rice and its physiological responses in changing selenium environments. **BMC Plant Biology** 19:1–11. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2163-6>

Lichtenthaler Hk, Wellburn Ar (1983) Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions* 11:591–592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>

Liu K, Li S, Han J, Zeng X, Ling M, Mao J, Li Y, Jiang J (2021) Effect of selenium on tea (*Camellia sinensis*) under low temperature: Changes in physiological and biochemical responses and quality. **Environmental Experimental Botany** 188:104475. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104475>

Lokstein H, Renger G, Gotze J (2021) Photosynthetic Light-Harvesting (Antenna) Complexes—Structures and Functions. **Molecules** 26:1–24

Lončarić Z, Ivezić V, Kerovec D, Rebekić A (2021) Foliar Zinc-Selenium and Nitrogen Fertilization Affects Content of Zn, Fe, Se, P, and Cd in Wheat Grain. **Plants** 10:1549. <https://doi.org/10.3390/plants10081549>

Luo L, Zhang J, Zhang K, Wen Q, Ming K, Xiong H, Ning F (2021) Peanut selenium distribution, concentration, speciation, and effects on proteins after exogenous selenium biofortification. **Food Chemistry** 354:129515. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129515>

Ma P, Zhang X, Chen L, Zhao Q, Zhang Q, Hua X, Wang Z, Tang H, Yu Q, Zhang M, Ming R, Zhang J (2020) Comparative analysis of sucrose phosphate synthase (SPS) gene family between *Saccharum officinarum* and *Saccharum spontaneum*. **BMC Plant Biology** 20:1–15. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02599-7>

Malerba M, Cerana R (2018) Effect of selenium on the responses induced by heat stress in plant cell cultures. *Plants* 7:1–10. <https://doi.org/10.3390/plants7030064>

Marchiori PER, Machado EC, Ribeiro R V. (2014) Photosynthetic limitations imposed by self-shading in field-grown sugarcane varieties. **Field Crop Research** 155:30–37. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.09.025>

Marin FR, Inman-Bamber G, Silva TGF, Vianna MS, Nassif DSP, Carvalho KS (2020) Sugarcane evapotranspiration and irrigation requirements in tropical climates. **Theoretical Applied Climatology** 140:1349–1357. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03161-z>

Marquardt A, Henry RJ, Botha FC (2021) Effect of sugar feedback regulation on major genes and proteins of photosynthesis in sugarcane leaves. **Plant Physiology Biochemistry** 158:321–333. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.022>

Mateus MP de B, Tavanti RFR, Tavanti TR, Santos EF, Jalal A, Reis AR dos (2021) Selenium biofortification enhances ROS scavenge system increasing yield of coffee plants. **Ecotoxicology Environmental Safety** 209. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111772>

Mezacasa A V., Queiroz AM, Graciano DE, Pontes MS, Santiago EF, Oliveira IP, Lopez AJ, Casagrande GA, Scherer MD, dos Reis DD, Oliveira SL, Caires ARL (2020) Effects of gold nanoparticles on photophysical behaviour of chlorophyll and pheophytin. **Journal Photochemical Photobiology American Chemical** 389:112252. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.112252>

Morales-Espinoza MC, Cadenas-Pliego G, Pérez-Alvarez M, Hernández-Fuentes AD, De La Fuente MC, Benavides-Mendoza A, Valdés-Reyna J, Juárez-

Maldonado A (2019) Se nanoparticles induce changes in the growth, antioxidant responses, and fruit quality of tomato developed under nacl stress. **Molecules** 24. <https://doi.org/10.3390/molecules24173030>

Mostofa MG, Hossain MA, Siddiqui MN, Fujita M, Tran LSP (2017) Phenotypical, physiological and biochemical analyses provide insight into selenium-induced phytotoxicity in rice plants. **Chemosphere** 178:212–223. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.046>

Nogueira BB, Vicente EF, Chaves PPN, Zanetti WAL, Ono EO, Silva GF, Reis AR, Putti FR (2022). Sugar Metabolism and Photosynthesis of Tomatoes Irrigated with Water Treated with Low-Frequency Electromagnetic Resonance Fields in Different Fertigation Doses. **Horticulturae** 8:1-15. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8100868>

Qamar Z, Nasir IA, Abouhaidar MG, Hefferon KL, Rao AQ, Latif A, Ali Q, Anwar S, Rashid B, Shahid AA (2021) Novel approaches to circumvent the devastating effects of pests on sugarcane. **Scientific Report** 11:1–25. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91985-8>

Radford PJ (1967) Growth Analysis Formulae - Their Use and Abuse 1 . **Crop Science** 7:171–175. <https://doi.org/10.2135/cropsci1967.0011183x000700030001x>

Rady MM, Belal HEE, Gadallah FM, Semida WM (2020) Selenium application in two methods promotes drought tolerance in Solanum lycopersicum plant by inducing the antioxidant defense system. **Science Horticulture** 266:109290. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109290>

Rady MM, Desoky EM, Ahmed SM, Majrashi A, Ali EF, Arnaout SMAI, Selem E (2021) Foliar Nourishment with Nano-Selenium Dioxide Promotes Physiology, Biochemistry, Antioxidant Defenses, and Salt Tolerance in Phaseolus vulgaris. **Plants** 10:1–20

Raij, B. van; Andrade, J.C.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. (2001). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas Instituto Agronômico. 285p.

Reis AR dos, Boleta EHM, Alves CZ, Cotrim MF, Barbosa JZ, Silva VM, Porto RL, Lanza MGDB, Lavres J, Gomes MHF, Carvalho HWP de (2020) Selenium toxicity in upland field-grown rice: Seed physiology responses and nutrient distribution using

the  $\mu$ -XRF technique. **Ecotoxicology Environmental Safety** 190:110147. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110147>

Ribeiro DM, Silva Júnior DD, Cardoso FB, Martins AO, Silva WA, Nascimento VL, Araújo WL (2016) Growth inhibition by selenium is associated with changes in primary metabolism and nutrient levels in *Arabidopsis thaliana*. **Plant Cell Environmental** 39:2235–2246. <https://doi.org/10.1111/pce.12783>

Sabatino L, La Bella S, Ntatsi G, Iapichino G, D'Anna F, De Pasquale C, Consentino BB, Roupael Y (2021) Selenium biofortification and grafting modulate plant performance and functional features of cherry tomato grown in a soilless system. **Scientia Horticulture** 285:110095. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110095>

Saeedi M, Soltani F, Babalar M, Izadpanah F, Wiesner-Reinhold M, Baldermann S (2021) Selenium Fortification Alters the Growth, Antioxidant Characteristics and Secondary Metabolite Profiles of Cauliflower (*Brassica oleracea* var. botrytis) Cultivars in Hydroponic Culture. **Plants** 10:1537. <https://doi.org/10.3390/plants10081537>

Saleem MF, Kamal MA, Shahid M, Awais M, Saleem A, Raza MAS, Ma BL (2021) Studying the foliar selenium-modulated dynamics in phenology and quality of terminal heat-stressed cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in association with yield. **Plant Biosystem** 155:668–678. <https://doi.org/10.1080/11263504.2020.1779835>

Schiavon M, Lima LW, Jiang Y, Hawkesford MJ (2017) Effects of Selenium on Plant Metabolism and Implications for Crops and Consumers. **Plant Ecophysiology** 11:257–275. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56249-0\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56249-0_15)

Shalaby TA, Abd-Alkarim E, El-Aidy F, Hamed ES, Sharaf-Eldin M, Taha N, El-Ramady H, Bayoumi Y, dos Reis AR (2021) Nano-selenium, silicon and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> boost growth and productivity of cucumber under combined salinity and heat stress. **Ecotoxicology Environmental Safety** 212. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111962>

Sharpe SM, Boyd NS (2019) Germination ecology for Florida populations of carpetweed (*Mollugo verticillata*), Carolina geranium (*Geranium carolinianum*), eclipta (*Eclipta prostrata*), and goosegrass (*Eleusine indica*). **Weed Science** 67:433–440. <https://doi.org/10.1017/wsc.2019.17>

Silva VM, Boleta EHM, Lanza MGDB, Lavres J, Martins JT, Santos EF, dos Santos FLM, Putti FF, Junior EF, White PJ, Broadley MR, Carvalho HWP de, Reis AR

dos (2018) Physiological, biochemical, and ultrastructural characterization of selenium toxicity in cowpea plants. **Environmental Experimental Botany** 150:172–182. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.020>

Silva VM, Nardeli AJ, Mendes NAC, Alcock TD, Rocha M de M, Putti FF, Wilson L, Young SD, Broadley MR, White PJ, Reis AR dos (2021) Application of sodium selenate to cowpea (*Vigna unguiculata* L.) increases shoot and grain Se partitioning with strong genotypic interactions. **Journal Trace Element Medicine Biology** 67. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2021.126781>

Silva VM, Rimoldi Tavanti RF, Gratão PL, Alcock TD, Reis AR dos (2020) Selenate and selenite affect photosynthetic pigments and ROS scavenging through distinct mechanisms in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) walp) plants. **Ecotoxicology Environmental Safety** 201:110777. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110777>

Taha RS, Seleiman MF, Shami A, Alhammad BA, Mahdi AHA (2021) Integrated application of selenium and silicon enhances growth and anatomical structure, antioxidant defense system and yield of wheat grown in salt-stressed soil. **Plants** 10:1–19. <https://doi.org/10.3390/plants10061040>

Wang J, Nayak S, Koch K, Ming R (2013) Carbon partitioning in sugarcane (*Saccharum* species). **Frontiers Plant Science** 4:2005–2010. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00201>

White RG, Kirkegaard JA (2010) The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil - Implications for water uptake. **Plant, Cell Environmental** 33:133–148. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02059.x>

Zahedi SM, Moharrami F, Sarikhani S, Padervand M (2020) Selenium and silica nanostructure-based recovery of strawberry plants subjected to drought stress. **Scientific Report** 10:1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74273-9>

Zhang Y Bin, Yang SL, Dao JM, Deng J, Shahzad AN, Fan X, Li RD, Quan YJ, Bukhari SAH, Zeng ZH (2020) Drought-induced alterations in photosynthetic, ultrastructural and biochemical traits of contrasting sugarcane genotypes. **PLoS One** 15:1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235845>

Zhou, X., Yang, J., Kronzucker, H.J., Shi, W., 2020. Selenium Biofortification and Interaction With Other Elements in Plants: A Review. **Frontiers Plant Science** 11, 1–18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.586421>

#### **CAPÍTULO 4** - Selênio alivia estresse hídrico na cana-de-açúcar: melhoria da produtividade da cultura e qualidade tecnológica da matéria-prima

**RESUMO** - A produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar é severamente reduzida pelo estresse hídrico. Neste cenário, o selênio (Se) tem papel benéfico documentado para estímulo do metabolismo antioxidante e tolerância das plantas a estresses ambientais. Uma investigação de campo foi conduzida para avaliar a melhor época de aplicação de selenato e selenito de sódio visando mitigar o estresse hídrico em cana-de-açúcar. O estudo foi realizado em experimentos de campo, sendo uma área com cana de sequeiro e outra com cana irrigada. Duas épocas foram definidas para realizar a aplicação foliar de Se: vegetativa e maturação. A concentração e acúmulo de Se na folha da cana de sequeiro foi maior com aplicação de selenito de sódio, enquanto que na cana irrigada o mesmo efeito foi observado com o selênio de sódio. A translocação e acúmulo de Se no caldo foi similar com as duas Se-fontes em ambas as épocas de aplicação e manejo da irrigação. Houve aumento da concentração de clorofilas, carotenoides e feofitina com uso de selenito de sódio aplicado na época vegetativa da cana de sequeiro. Observamos que o selenito de sódio aumentou a atividade da enzima catalase e ascorbato peroxidase na cana de sequeiro aplicado na época vegetativa e época de maturação, reduzindo peróxido de hidrogênio e peroxidação lipídica com uso do selenito de sódio, principalmente quando aplicado na época de maturação. O efeito antioxidante do selenito de sódio promoveu aumento de açúcares, sacarose, proteínas solúveis e aminoácidos nas folhas, principalmente quando aplicado na época de maturação. O selenato e selenito de sódio aumentaram o tamanho da planta e número de perfilhos quando aplicados na época de maturação da cana de sequeiro, porém apenas na cana irrigada promoveu aumento da produtividade de perfilhos quando aplicados na época vegetativa. Observamos que ambas as Se-fontes são eficazes para aumento da produtividade de açúcar nas duas épocas de aplicação na cana irrigada, porém na cana de sequeiro deve ser aplicado apenas na época de maturação. Dessa forma, fica claro que o Se aumenta a tolerância da cana de sequeiro ao estresse hídrico e melhora o potencial produtivo da cana irrigada.

**Palavras-chave:** estresse abiótico, seca, selênio, selenato, selenito, tempo de aplicação

#### **CHAPTER 4 - Selenium alleviate water stress in sugarcane: improvement in crop yield and technological quality of the raw material**

**ABSTRACT** - The productivity and technological quality of sugarcane is severely reduced by water stress. In this scenario, selenium (Se) has a documented beneficial role in stimulating antioxidant metabolism and plant tolerance to environmental stress. A field investigation was carried out to evaluate the best time to apply selenate and sodium selenite in order to mitigate water stress in sugarcane. The study was carried out in field experiments, being an area with rainfed sugarcane and another with irrigated sugarcane. Two times were defined to carry out the foliar application of Se: vegetative and pre-harvest. The concentration and accumulation of Se in rainfed cane leaves was higher with application of sodium selenite, while in irrigated cane the same effect was observed with sodium selenate. The translocation and accumulation of Se in the broth was similar with the two Se-sources at both application times and irrigation management. There was an increase in the concentration of chlorophylls, carotenoids and pheophytin with the use of sodium selenite applied in the growing season of dry cane. We observed that sodium selenite increased the activity of the enzyme catalase and ascorbate peroxidase in dry cane applied in the growing season and maturation stage, reducing hydrogen peroxide and lipid peroxidation with the use of sodium selenite, especially when applied in pre-harvest. The antioxidant effect of sodium selenite promoted an increase in sugars, sucrose, soluble proteins and amino acids in leaves, especially when applied in pre-harvest. Sodium selenate and selenite increased plant size and number of tillers when applied in the pre-harvest of rainfed cane, but only in irrigated cane did it promote an increase in tiller productivity when applied in the growing season. We observed that both Se-source are effective for increasing sugar productivity in the two application times in irrigated sugarcane, however in rainfed sugarcane it should be applied only in maturation stage. Thus, it is clear that Se increases the tolerance of rainfed sugarcane to water stress and improves the productive potential of irrigated sugarcane.

**Keywords:** abiotic stress, drought, selenate, selenite, application time

## 1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é um dos principais recursos renováveis para a produção de biocombustíveis, respondendo por 40% do bioetanol, além de contribuir com 80% da produção mundial de açúcar e cogeração de energia elétrica limpa (Ashwin Narayan et al., 2021; Gilani et al., 2020; Rabelo et al., 2019). O setor sucroenergético enfrenta grandes desafios para a produção agrícola devido às mudanças climáticas globais que tem aumentado a incidência e a gravidade de diversos estresses abióticos como a seca, calor, luminosidade e geadas que reduzem consideravelmente o rendimento da colheita (Ortiz-Bobea et al., 2021). Em muitas partes do mundo, a precipitação está se tornando menos previsível e mais intensa, com períodos de seca mais frequentes. Além disso, as lavouras frequentemente sofrem temperaturas elevadas, que, devido à escassez prolongada de água, aumentam a evapotranspiração, levando a problemas de seca (Cui et al., 2022).

Os efeitos combinados da seca impactam negativamente no alongamento das folhas da cana-de-açúcar, reduz a taxa fotossintética e o teor de clorofila das folhas, reduz a capacidade de absorção de nutrientes, levando à diminuição do rendimento de perfilhos, biossíntese de sacarose e acúmulo açúcar no colmo na fase final de maturação (Garcia et al., 2018; Selvi et al., 2020; Xu et al., 2018). O estágio de perfilhamento é a fase da cana-de-açúcar mais sensível ao estresse hídrico, pois a falta de água nesse período provoca encurtamento do colmo na ordem de 45%, redução do peso do perfilho em 26% e do número de perfilhos em 23% (Hemaprabha et al., 2013; Mahadevaiah et al., 2021; Reyes et al., 2020; Ribeiro et al., 2013).

Esses efeitos negativos da seca sobre a cana-de-açúcar ocorrem porque a nível metabólico a seca promove aumento anormal de espécies reativas de oxigênio (EROS) que degradam biomoléculas vitais para o crescimento e desenvolvimento normal das plantas, tais como: DNA, RNA, proteínas, lipídeos e pigmentos fotossintetizantes. Essas EROS são produzidas em condições normais do metabolismo vegetal, mas são superproduzidas em condições estressantes, e as essas EROS estão presentes na forma de ânion superóxido ( $O_2^{\cdot-}$ ), peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), radical livre hidroxila ( $OH\cdot$ ), oxigênio singlete ( $^1O_2$ ), radical metil

( $\text{CH}_3\cdot$ ) e radicais livres de peroxidação lipídica ( $\text{LOO}\cdot$ ,  $\text{ROO}\cdot$ ) (Fonseca et al., 2022; Sachdev et al., 2021; Scudeletti et al., 2021).

Nesse contexto, o uso de selênio (Se) tem recebido grande atenção na agricultura para aumentar a produtividade agrícola (Cunha et al., 2022; Mateus et al., 2021; Shalaby et al., 2021) através do seu papel como mitigador de estresses ambientais (Liu et al., 2021; Morales-Espinoza et al., 2019; Rasool et al., 2022). O Se é reconhecido como um elemento benéfico com efeitos significativos na mitigação de estresses como salinidade (El-Badri et al., 2022), seca (Patnaik et al., 2023), calor (Moullick et al., 2023), metais pesados (Cunha e Prado, 2023) e herbicidas (Afzal et al., 2022). O Se é um elemento benéfico que atua estimulando o metabolismo antioxidante pelo aumento da atividade da superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX) e glutathiona redutase (GR) que são enzimas responsáveis pela homeostase de EROS intracelular a níveis não danosos para as plantas (Lanza e Reis, 2021).

Além disso, o Se atua aumentando a biossíntese de compostos não enzimáticos (ácido ascórbico, tocoferol e flavonoides) que permitem à planta desintoxicar de EROS em excesso (Hasanuzzaman et al., 2020; Lanza e Reis, 2021; Saeedi et al., 2021). O Se tem sido amplamente utilizado para mitigar o estresse hídrico em arroz (Luo et al., 2021; Patnaik et al., 2023), trigo (Sardari et al., 2022; Yadav et al., 2023), tomate (Saleem e Fariduddin, 2022) e batata (Perfileva et al., 2022) com efeitos pronunciados na redução de EROS, e aumento da produtividade e qualidade agrícola. Em trabalhos com café, feijão-caupi e amendoim tem se observado que o Se em doses baixas regula a atividade fotossintética pelo estímulo da rota de conversão de clorofila a para clorofila b, protegendo o fotossistema II contra os efeitos nocivos do aumento anormal de EROS. Além disso, tem-se observado comumente o aumento da concentração de carotenoides que atuam como pigmentos fotoprotetores que otimiza a eficiência fotoquímica do complexo antena. A suplementação com Se também está relacionada ao aumento da concentração de feofitina na folha, sendo este um pigmento responsável por dissipar o excesso de energia evitando processos de fotoinibição e fotooxidação da clorofila em plantas sob estresse (Cunha et al., 2022; Mateus et al., 2021; Silva et al., 2020).

Diversos trabalhos tem sido realizados com uso do Se como mitigador de estresse hídrico, como em arroz (Luo et al., 2021), trigo (Sardari et al., 2022), tomate (Saleem e Fariduddin, 2022) e batata (Perfileva et al., 2022), porém estudos do uso de Se em cana-de-açúcar ainda carece de mais informações.

A hipótese deste estudo é que o Se alivia o estresse hídrico em cana-de-açúcar de modo a aumentar a produtividade e qualidade da matéria prima. Dessa forma, o objetivo do trabalho é caracterizar a melhor época de aplicação do selenato e selenito de sódio, visando atenuação do estresse hídrico em cana-de-açúcar.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Caracterização da área experimental**

O estudo consistiu em dois experimentos de campo conduzidos na safra 2021/2022, sendo a primeira área de sequeiro e a segunda área irrigada. A primeira área experimental está localizada no município de Suzanápolis/SP (20°30' S e 51°01' O; 380 m altitude) e a segunda área experimental está localizada no município de Ilha Solteira/SP (20°25' S e 51°20' O; 365 m altitude), conforme mostra na Figura 1 e Figura 2. As áreas experimentais estão a 15,5 km de distância. O clima da região utilizada no estudo é classificado como tipo Aw, segundo Köppen, com temperatura média anual de 24,5 °C, precipitação média anual de 1.232 mm, e umidade relativa média de 64,8%. Os dados climatológicos durante a condução dos experimentos são apresentados na Figura 3.

Ambas as áreas têm características edafoclimáticas semelhantes, sendo o solo classificado como Latossolo Vermelho mesotrófico de textura e fertilidade média. As propriedades físico-químicas das camadas de 0,00–0,20 e 0,20–0,40 m de profundidade são mostradas na Tabela 1. Os atributos físicos foram determinados segundo e as propriedades químicas foram determinadas de acordo com van Raij et al. (2001). Foi realizado aplicação de calcário dolomítico (28% de óxido de cálcio – CaO, 18% de óxido de magnésio – MgO, e 81% de equivalentes de carbonato de cálcio – %ECaCO<sub>3</sub>) PRNT 85% 60 dias antes da instalação do experimento para aumentar a saturação de base das camadas 0,00–0,20 m e 0,20–0,40 m para 70% e

fornecer Ca e Mg, conforme metodologia de van Raij et al. (2001). Aplicou-se também  $1 \text{ t ha}^{-1}$  de gesso e  $540 \text{ kg ha}^{-1}$  de fosfato natural reativo.



Figura 1 – Localização dos experimentos de campo.



Figura 2 – Experimento de campo de sequeiro (A) e irrigado (B).

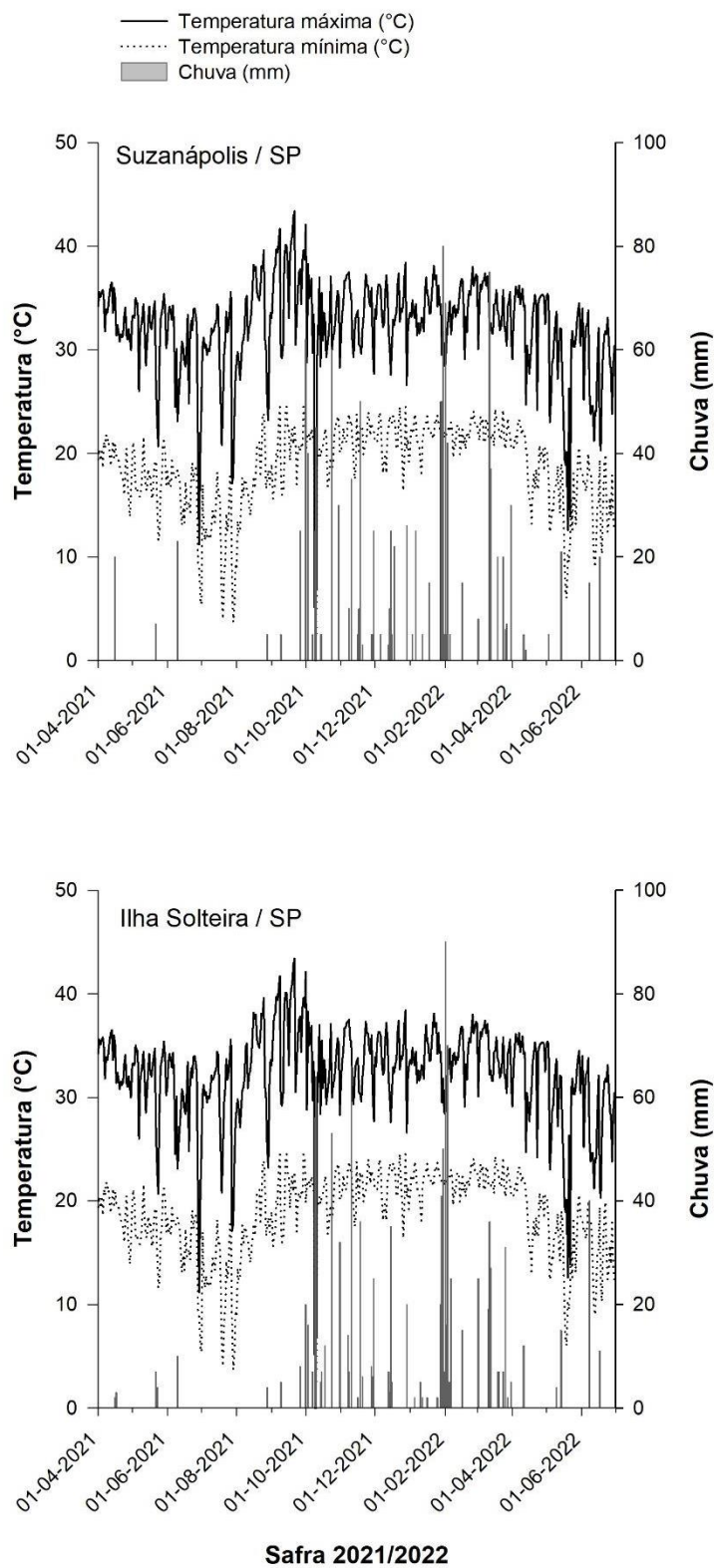


Figura 3 – Dados climáticos durante a condução dos experimentos de campo.

Tabela 1 – Caracterização físico-química do solo nas duas áreas experimentais nas camadas de 0,0 a 0,2 m e 0,2- a 0,4 m.

Local experimental	Prof (cm)	pH	P (res.) mg dm <sup>3</sup>	K	Ca	Mg	S	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Areia	Silte	Argila
								mmolc dm <sup>3</sup>				%				mg dm <sup>3</sup>			%		
Suzanápolis SP	0-20	5,2	5,0	2,3	14,1	8,5	4,8	0,1	18,8	24,9	43,7	56,5	0,5	0,1	0,9	37,6	34,8	0,8	75,4	8,3	16,3
	20-40	5,3	4,3	1,8	15,3	8,3	3,0	0,2	17,9	25,3	43,2	58,6	0,7	-	-	-	-	-	72,8	10,3	16,9
Ilha Solteira -SP	0-20	5,1	7,2	2,3	13,6	7,3	5,0	0,1	24,0	23,3	47,3	48,8	0,3	0,1	1,2	65,7	37,6	1,3	75,0	8,3	16,7
	20-40	5,2	5,0	1,3	14,0	5,9	4,4	0,0	16,6	21,2	37,8	55,9	0,0	-	-	-	-	-	71,2	8,2	20,6

O plantio na área de sequeiro (Suzanápolis - SP) foi feito no dia 17 de abril de 2021 e a área irrigada (Ilha Solteira – SP) foi realizado no dia 28 de abril de 2021. O plantio mecanizado foi realizado com 1,5 m de espaçamento de entrelinha. Foi aplicado via sulco de plantio 400 kg ha<sup>-1</sup> da formula 06-30-10 + 5% Zn e na calda de cobertura 0,33 L ha<sup>-1</sup> fipronil, 1,5 L ha<sup>-1</sup> bionematicida/fungicida (*Trichoderma harzianum*, 2 x 10<sup>9</sup> conídios mL<sup>-1</sup>), 0,3 L ha<sup>-1</sup> de inoculante (*Azospirillum brasilense* 2 x 10<sup>8</sup> UFC mL<sup>-1</sup>) e 0,5 L ha<sup>-1</sup> de regulador de crescimento (ácido 4-indol-3-ilbutírico, ácido giberélico e cinetina). A variedade de cana-de-açúcar utilizada foi a RB966928 que é resultado do cruzamento das variedades RB855156 x RB815690, apresenta excelente brotação em cana-planta, alto perfilhamento em cana-planta e em cana-soca, com excelente fechamento de entrelinhas, produção agrícola alta, alto teor de sacarose, período útil de industrialização médio e maturação precoce. Aos 50 dias após o plantio foi feita a operação de quebra-lombo com 230 kg ha<sup>-1</sup> de 12-00-36 + 0,8%B (ulexita). O manejo de plantas daninhas, pragas e doenças foi feito de acordo com padrão técnico recomendado para cultura.

A colheita da área de sequeiro ocorreu dias 29 de Abril de 2021 e a colheita da área irrigada ocorreu dias 6 de maio de 2021.

## 2.2 Tratamentos e desenho experimental

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com quatro repetições por tratamento em esquema fatorial 3 (Se-tratamentos) x 2 (épocas de aplicação) x 2 (manejo da irrigação) compondo 12 tratamentos conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo dos tratamentos.

Tratamentos	Tratamento com Se x Época de aplicação x Manejo da irrigação
T1	Controle x Vegetativo x Sequeiro
T2	Selenato de sódio x Vegetativo x Sequeiro
T3	Selenito de sódio x Vegetativo x Sequeiro
T4	Controle x época de maturação x Sequeiro
T5	Selenato de sódio x época de maturação x Sequeiro
T6	Selenito de sódio época de maturação x Sequeiro
T7	Controle x Vegetativo x Irrigado
T8	Selenato de sódio x Vegetativo x Irrigado
T9	Selenito de sódio x Vegetativo x Irrigado

T10	Controle x época de maturação x Irrigado
T11	Selenato de sódio x época de maturação x Irrigado
T12	Selenito de sódio x época de maturação x Irrigado

---

Os tratamentos com Se consistiram de aplicação foliar de 40 g ha<sup>-1</sup> de selenato de sódio, 20 g ha<sup>-1</sup> de selenito de sódio e controle. A dose recomendada de selenato e selenito de sódio para cana-de-açúcar foi estabelecida em trabalhos anteriores (Capítulos 2 e 3). Quanto à época de aplicação, utilizaram-se duas épocas: vegetativo e época de maturação. A aplicação na época vegetativa foi feita aos 8 meses de idade do canavial e a aplicação época de maturação foi feita 60 dias antes da colheita, coincidindo com os meses de dezembro/2021 e março/2022, respectivamente.

A aplicação de Se foi feita com drone AGRAS MG-1p dji com operação autônoma de alta precisão RTK com capacidade de tanque de 10 L e possuindo bico tipo cone vazio Teejet nº 1. A vazão utilizada foi de 10 L ha<sup>-1</sup>, com velocidade de operação de 10 km h<sup>-1</sup> e altura de voo de 3,5 m.

O manejo de irrigação consistiu em manejo de sequeiro e irrigado realizado por meio de sistema de irrigação por aspersão autopropelido tipo carretel enrolador, visando suprir a demanda hídrica da cultura conforme a evapotranspiração calculada em função do estágio fenológico da cana-de-açúcar (Tabela 3 e 4).

Os dados de evapotranspiração de referência foram obtidos da estação experimental da UNESP de Ilha Solteira/SP (<https://clima.feis.unesp.br/>) e os dados de chuva foram obtidos de pluviômetros instalados no local do experimento.

Cada parcela experimental foi constituída de oito linhas de 10 m de comprimento, sendo que as três linhas de cada extremidade foram consideradas como bordadura. Desse modo, a área útil de cada parcela foi composta por duas linhas centrais de 10 m de comprimento, perfazendo uma área útil de 30 m<sup>2</sup>. Aos 14 dias após os tratamentos foi coletada a primeira folha expandida com dewlap visível a partir do topo da planta de 20 perfilhos de cada tratamento para análises nutricionais e bioquímicas.

Tabela 3 – Balanço hídrico do experimento de manejo de sequeiro em Suzanópolis, São Paulo, Brasil.

Balanço hídrico do campo experimental	U.M	2021										2022				
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	
Chuva	mm / mês	20.0	7.0	23.0	0.0	0.0	10.0	105.0	151.0	70.0	100.0	160.0	140.0	70.0	26.0	
Evapotranspiração*	mm / mês	106.1	89.8	78.1	88.5	109.7	135.9	121.4	126.1	114.8	124.2	117.6	105.5	99.5	76.5	
Coef. cultivo	Kc	0.40	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
Evapotranspiração potencial (EP)	mm / mês	42.4	53.9	54.7	70.8	98.7	135.9	121.4	126.1	114.8	124.2	117.6	105.5	99.5	76.5	
Balanço (Chuva - EP)	mm / mês	-22	-47	-32	-71	-99	-126	-16	25	-45	-24	42	35	-30	-51	
Capacidade de água disponível (CAD)	mm	122.9	76.1	44.4	0.0	0.0	0.0	0.0	24.9	0.0	0.0	42.4	76.9	47.4	0.0	
CAD	%	89%	61%	44%	6%	0%	0%	3%	13%	7%	0%	36%	25%	65%	17%	

\* Evapotranspiração de referência com base no modelo de Penman-Monteith

Tabela 4 – Balanço hídrico do experimento de manejo de irrigado em Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.

Balanço hídrico do campo experimental	U.M	2021										2022				
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	
Chuva	mm / mês	5.0	11.0	10.0	0.0	4.0	13.0	272.0	176.0	50.0	131.0	226.0	166.0	12.0	19.0	
Evapotranspiração*	mm / mês	106.1	89.8	78.1	88.5	119.6	135.9	121.4	126.1	114.8	124.7	105.9	111.2	94.0	74.1	
Coef. cultivo	Kc	0.40	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
Evapotranspiração potencial (EP)	mm / mês	14.1	18.0	18.2	23.6	35.9	45.3	40.5	42.0	38.3	41.6	35.3	37.1	31.3	24.7	
Balanço (Chuva - EP)	mm / mês	6	11	13	19	32	45	40	42	38	42	35	37	31	25	
Capacidade de água disponível (CAD)	mm	100.4	79.0	65.3	69.6	87.3	90.6	80.9	84.1	76.5	83.1	70.6	74.1	62.7	49.4	
Volume de irrigação	mm	50	50	35	35	35	35	35	70	35	70	35	35	0	0	
CAD	%	86%	82%	82%	78%	31%	0%	97%	100%	66%	33%	93%	89%	70%	44%	

\* Evapotranspiração de referência com base no modelo de Penman-Monteith

### 2.3 Análise química foliar e do caldo

Aos 14 dias após a aplicação dos tratamentos, foi coletado folhas+3 (folha diagnose) (Gallo et al., 1962) e depois foi seco em estufa a  $45 \pm 5$  °C por 72 h até atingir peso constante e moído em moinho de facas de aço inoxidável Willey. Uma amostra de 0,20 g de peso seco foi colocada em recipientes de digestão com perfluoroalcoxis (PFA) com adição de 6 mL de HNO<sub>3</sub> PA 65% (Merch). A digestão foi realizada em um sistema de micro-ondas composto por uma plataforma Multiwave GO com rotor de 12 vasos (Anton Paar, Graz, Áustria). Na colheita foi extraído o caldo do colmo para análise de Se no caldo. As amostras de folha e caldo foram utilizadas para determinar as concentrações de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e selênio (Se) e demais elementos após digestão com ácido nítrico PA (Merch) e posterior análise por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS).

As configurações de digestão foram definidas como: temp = 195 °C, tempo = 45 min de rampa e 20 min de espera, dois recipientes contendo apenas ácido nítrico e duas réplicas de material de referência certificado (CRM) para Se foram adicionados a cada três corridas. O CRM utilizado foi o BCR 402 (trevo branco) com recuperação de Se de 97%. Após a digestão, 9 mL de água mili-Q foram adicionados a cada tubo para perfazer um volume final de 15 mL e armazenados à temperatura ambiente. Os digeridos foram diluídos para 1:5 adicionando água mili-Q antes da análise elementar. Os elementos foram analisados por ICP-MS (Agilent 7500ce, Agilent Technologies®, Tóquio-Japão) conforme descrito anteriormente por Silva et al. (2018).

### 2.4 Acúmulo e translocação de Se

Para determinação do acúmulo de Se na parte aérea da cana-de-açúcar foi inicialmente quantificado a massa seca da parte aérea conforme descrito no item 2.8. O acúmulo de Se na parte aérea da cana-de-açúcar foi calculado conforme descrito abaixo:

Acúmulo Se = Concentração de Se folha x Massa seca da parte aérea

A translocação do Se foi calculado com base no acúmulo de Se no caldo e acúmulo total de Se na parte aérea (Wang et al., 2020), conforme abaixo:

$$\% \text{ Translocação} = \text{Acúmulo Se no caldo} / \text{Acúmulo total Se} \times 100$$

## 2.5 Análises de pigmentos fotossintéticos

As determinações dos pigmentos fotossintéticos (clorofilas, carotenóides e feofitina) foram baseadas na descrição de Lichtenthaler e Wellburn (1983) utilizando acetona 80% como solvente. A extração foi realizada com 0,5 g de matéria fresca em 5 mL de acetona 80%. As concentrações de clorofila total, feofitina total e carotenóides são expressas em  $\mu\text{g mL}^{-1}$ .

## 2.6 Análises do metabolismo antioxidante

As foram coletadas em nitrogênio líquido e armazenadas em ultracongelador até a análise. O peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) foi avaliado de acordo com Alexieva et al. (2001) e a concentração de malondialdeído (MDA) foi avaliada de acordo com Heath e Packer (1968). Para a análise do metabolismo antioxidante, as folhas foram extraídas usando tampão fosfato de potássio 100 mM (pH 7,5). Os extratos vegetais foram homogeneizados e centrifugados a  $10.000 \times g$  por 30 min a  $4^\circ\text{C}$ . Após a centrifugação, o sobrenadante foi usado para medir proteínas totais (Bradford, 1976), atividade da superóxido dismutase (SOD) (Giannopolitis e Ries, 1977), atividade da catalase (CAT) (Azevedo et al., 1998), atividade da ascorbato peroxidase (APX) (Moldes et al., 2008) e glutathione redutase (GR) (Gomes-Junior et al., 2006).

## 2.7 Análise de açúcares e compostos nitrogenados

A concentração de açúcares totais, sacarose, aminoácidos e proteína solúvel foi determinada nas folhas. Para determinar os açúcares totais e compostos N, 1 g de folhas frescas foi macerado e adicionado a tubos falcon contendo 10 mL de solução

MCW (60% v v<sup>-1</sup> metanol, 25% v v<sup>-1</sup> clorofórmio e 15% v v<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O). Após 48 h, 4 mL do sobrenadante foram coletados e transferidos para outro tubo falcon e foram adicionados 1 mL de clorofórmio e 1,5 mL de água deionizada.

Após a centrifugação, o extrato foi usado para medir açúcares totais (Dubois et al., 1956), sacarose (Van Handel, 1968), proteína solúvel (Bradford, 1976) e aminoácidos (Yemm et al., 1955).

## **2.8 Biometrias e produtividade**

Em maio de 2022 foi feita avaliação de altura (m), diâmetro (cm) e número de perfilhos (n°perfilhos m<sup>-1</sup>) com auxílio de trena e paquímetro, respectivamente. A cana foi despalhada e as folhas+palmito foram acondicionadas em sacos de papel para secagem na estufa a 45 ± 5 °C por 72 h até atingir peso constante (kg). Após a extração do caldo, o bagaço foi acondicionado e levado para estufa a 45 ± 5 °C por 72 h até atingir peso constante (kg). Posteriormente, foi determinado a massa seca de folha (MSF) e do bagaço (MSB), sendo a soma MSF+MSB definido como massa seca da parte aérea (MSPA), expresso em kg.

Na ocasião da colheita, foram colhidas as duas linhas centrais de cada parcela e foi feito a retirada da palha e ponteiro. Com auxílio de balança, obteve-se a massa de perfilhos por parcela (kg m<sup>-2</sup>) que foi utilizada para estimativa da produtividade de perfilhos por hectare (t ha<sup>-1</sup>).

## **2.9 Análise tecnológica da matéria prima**

Na época de colheita, 10 perfilhos por parcela foram coletados para análise tecnológica por meio da avaliação dos teores de sacarose (Pol%), pureza, açúcares redutores, concentração de sólidos solúveis (°Brix) e açúcar total recuperável, determinados de acordo com os métodos descritos por Consecana (2006). A produtividade de açúcar foi calculada pela multiplicação da produtividade de perfilhos (Mg ha<sup>-1</sup>) e açúcar total recuperável (kg Mg<sup>-1</sup>) de acordo com os métodos descritos por Consecana (2006).

## 2.10 Análise estatística

Os dados foram submetidos à ANOVA e, em seguida, analisados estatisticamente significantes ao nível de 5% de probabilidade de erro. Os pressupostos do modelo foram avaliados pelo teste de Shapiro-Wilk e a homocedasticidade de variância pelo teste de Hartley. As interações entre os tratamentos de Se, época de aplicação e manejo da irrigação, quando significativas, foram analisadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. Os gráficos foram feitos no software SigmaPlot, versão 12.5.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Concentração, acúmulo e translocação de Se

Observa-se que na área de sequeiro, a concentração de Se na folha foi aumentada no tratamento com selenito de sódio nas duas épocas de aplicação do elemento. Por outro lado, na cana-de-açúcar irrigada, a concentração de Se foi aumentada apenas no tratamento com selenato de sódio aplicado na época vegetativa da cultura (Figura 4A). Quanto ao acúmulo de Se na parte aérea, observa-se que os tratamentos com selenito de sódio na área de sequeiro resultou em maior acúmulo do elemento nas duas épocas de aplicação. Na área irrigada, o selenato de sódio ocasionou maior acúmulo de Se na parte aérea quando aplicado na época vegetativa. Já a aplicação na época de maturação feita na área irrigada, observa-se que tanto o selenato quanto o selenito de sódio ocasionaram maior acúmulo do Se na parte aérea da cana-de-açúcar (Figura 4B). De modo geral, foi possível notar que a aplicação dos tratamentos com Se na área irrigada na época da época de maturação tiveram resultados menos expressivos de aumento na concentração e acúmulo de Se na cana-de-açúcar (Figura 4A e 4B).

Na Figura 4C mostra que houve aumento da concentração de Se no caldo da cana-de-açúcar tratada com Se e se mostrou uma resposta independente do manejo da irrigação, época de aplicação e da fonte de Se utilizada na adubação foliar. A

translocação do Se na cana-de-açúcar de sequeiro aplicada na época vegetativa teve melhor resultado utilizando o selenato de sódio.

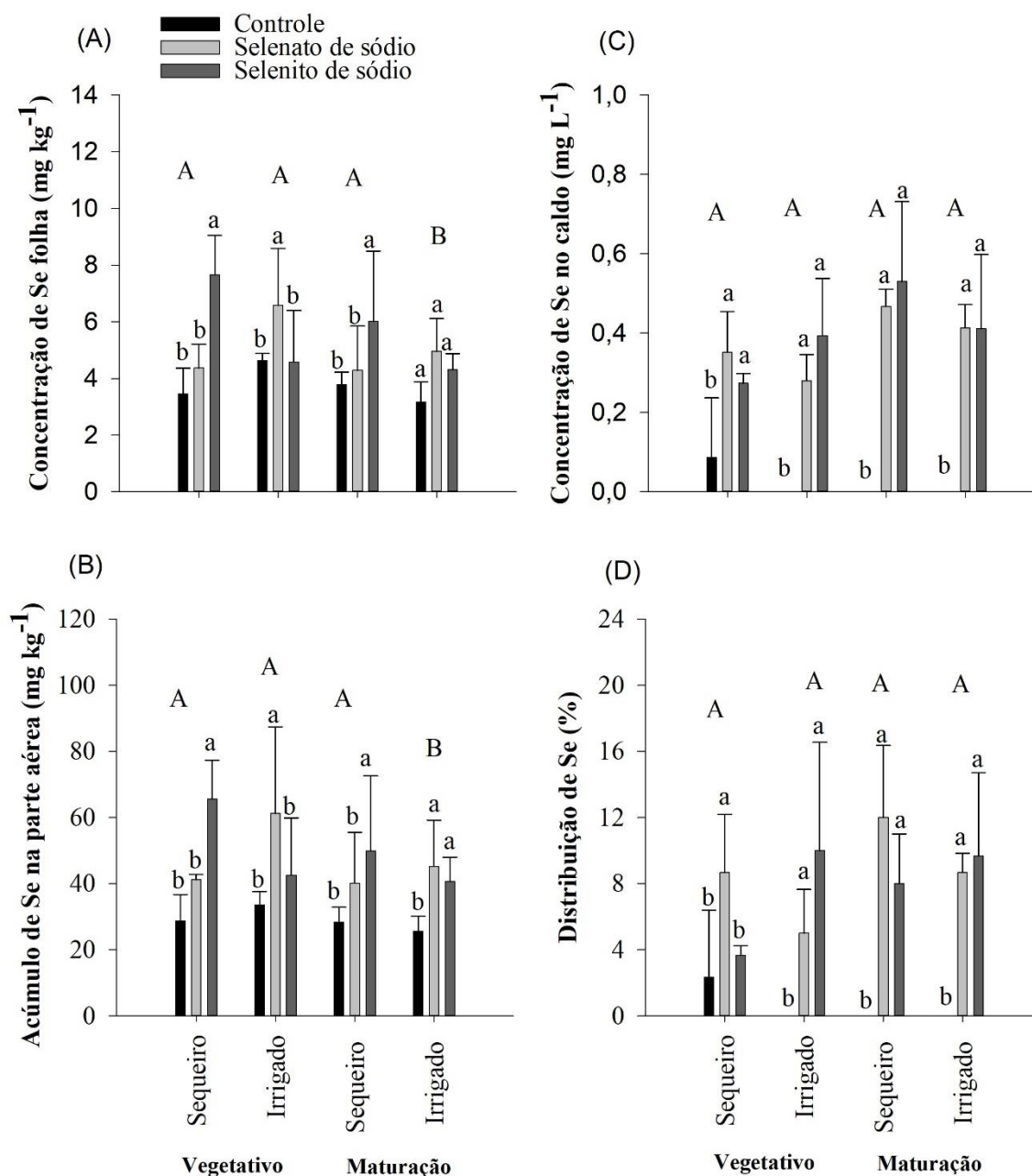


Figura 4 - Concentração foliar de Se (A), acúmulo de Se na parte aérea (B), concentração de Se no caldo (C) e translocação de Se (D) em resposta ao selenato de sódio e selenito aplicados na fase vegetativa e época de maturação da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as épocas de aplicação de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos com Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 4$  repetições).

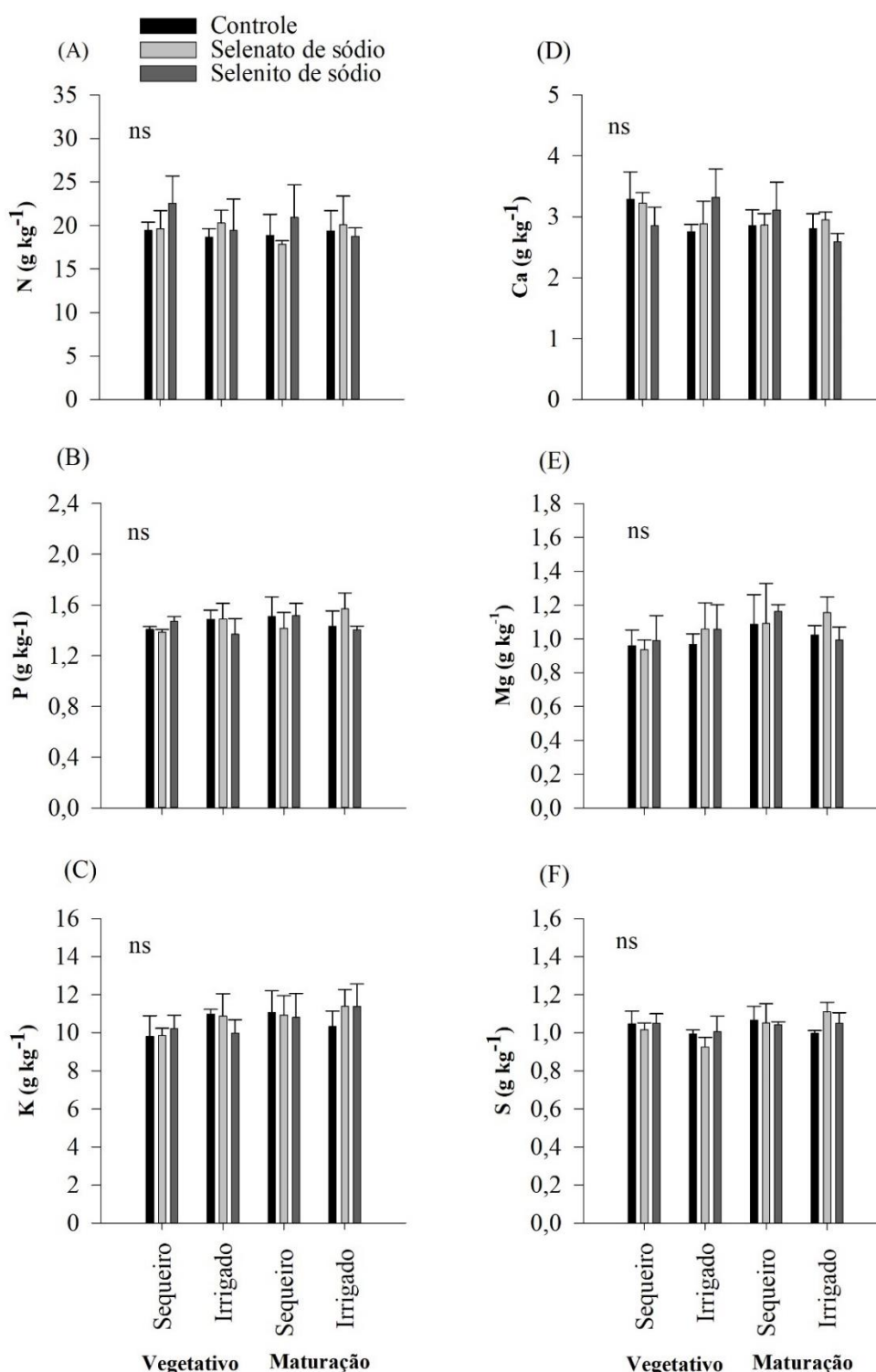


Figura 5 - Concentração de macronutrientes em folhas de cana-de-açúcar tratadas com selenato e selenito em duas épocas de aplicação (época vegetativa e maturação) em regime de sequeiro e irrigado. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as épocas de aplicação de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos com Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 4$  repetições).

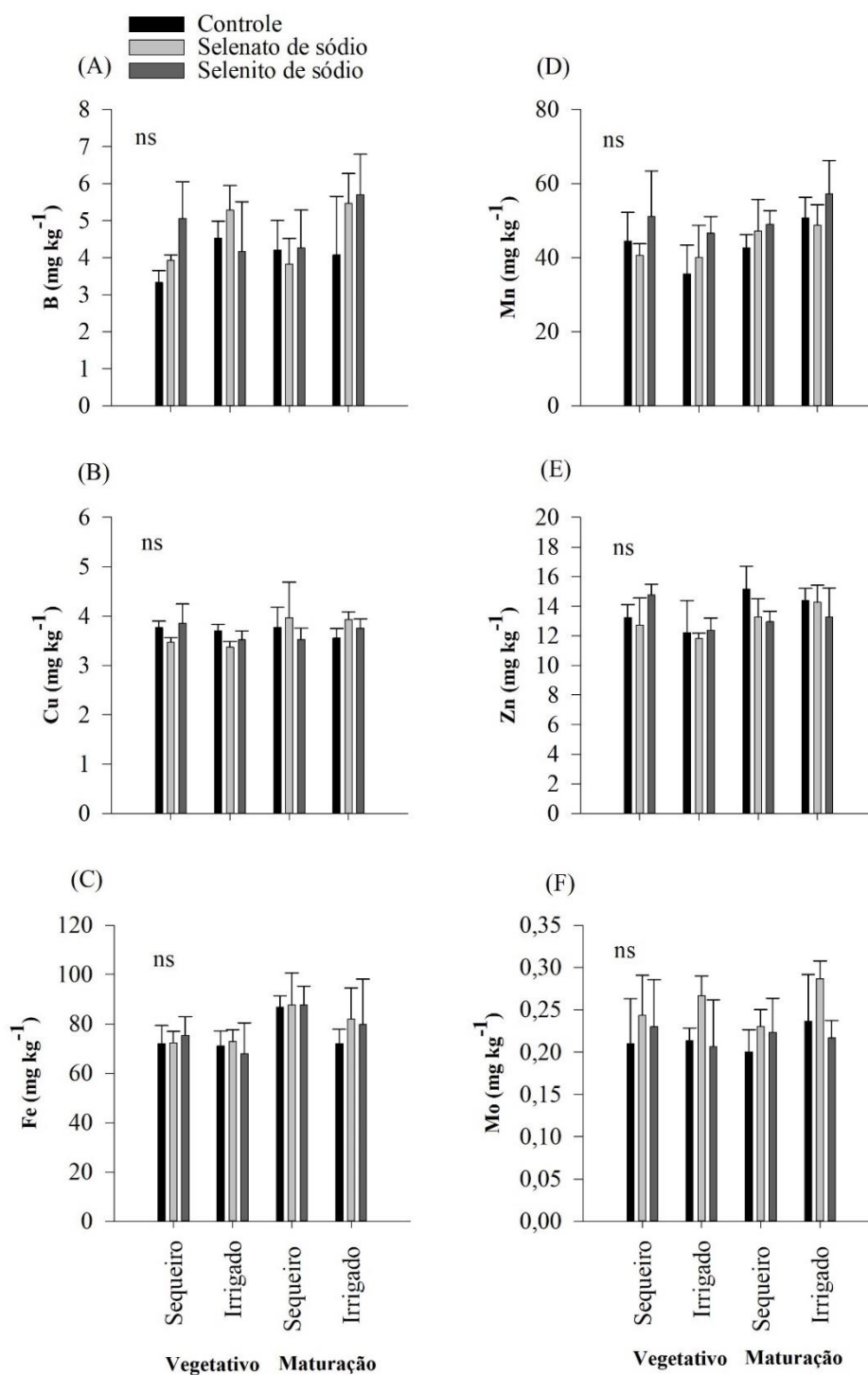


Figura 6 - Concentração de micronutrientes em folhas de cana-de-açúcar tratadas com selenato e selenito em duas épocas de aplicação (época vegetativa e maturação) em regime de sequeiro e irrigado. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as épocas de aplicação de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos com Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 4$  repetições).

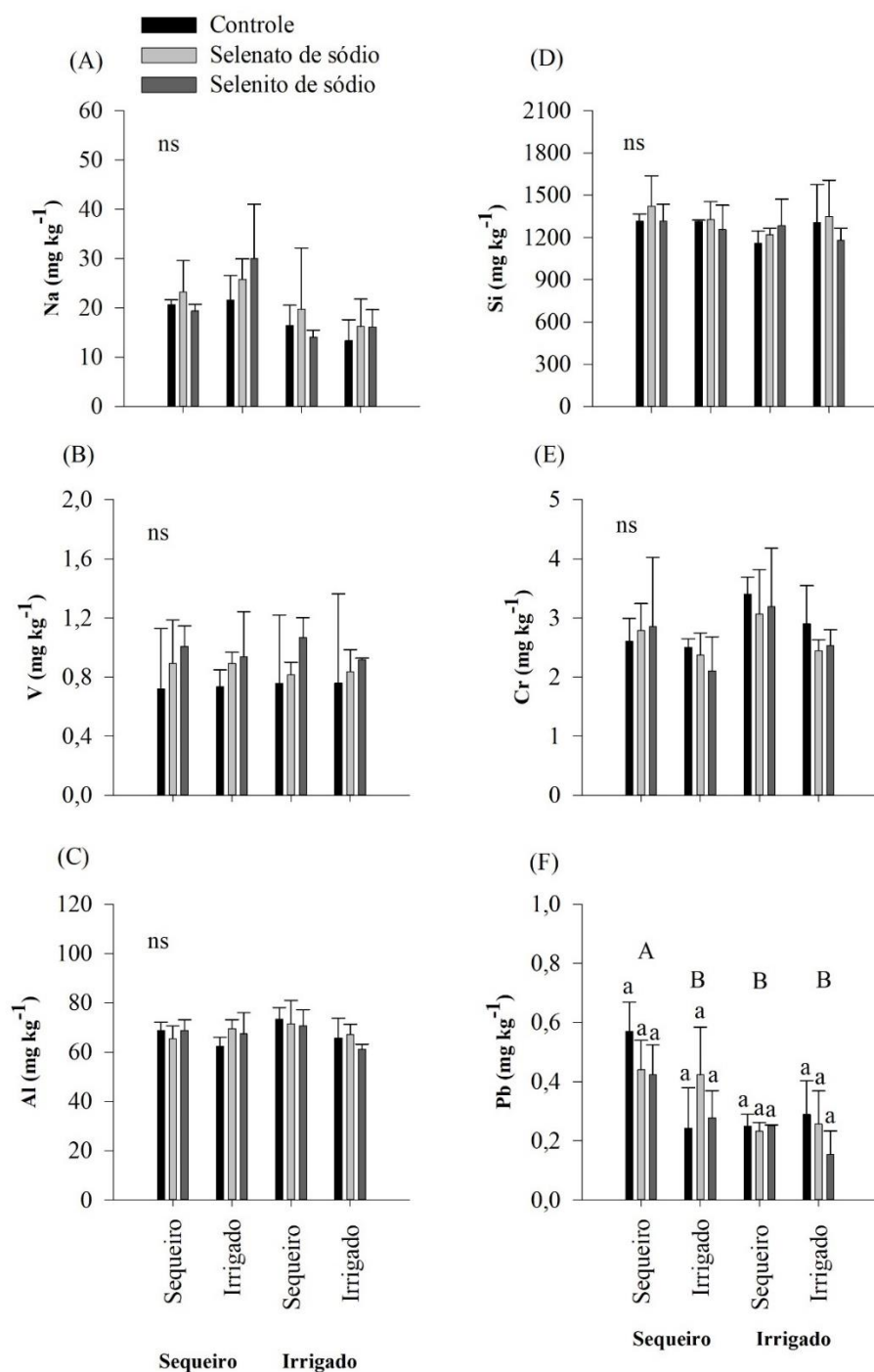


Figura 7 - Concentração de sódio (Na), vanádio (V), alumínio (Al), silício (Si), cromo (Cr) e chumbo (Pb) em folhas de cana-de-açúcar tratadas com selenato e selenito em duas épocas de aplicação (época vegetativa e maturação) em regime de sequeiro e irrigado. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as épocas de aplicação de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos com Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 4$  repetições).

Na época da época de maturação, tanto o selenato quanto o selenito de sódio foram capazes de promover translocação de Se da folha para o colmo da cana de sequeiro. Já no manejo irrigado, a translocação foi igualmente semelhantes aplicando selenato ou selenito de sódio, independentemente da época de aplicação (Figura 4D).

Não houve alterações nas concentrações foliares de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Ni, Na, V, Al, Si, Cr, Pb, Co e Cd em cana-de-açúcar em função dos tratamentos utilizados (Figura 5, 6 e 7).

### **3.2 Pigmentos fotossintéticos e metabolismo antioxidante**

A concentração de clorofila a, clorofila b, clorofila total, carotenóides e feofitina a foi aumentada apenas na cana de sequeiro com a utilização de selenito de sódio aplicado na época vegetativa (Figura 8A, 8B, 8C, 8D e 8E). Já a concentração de feofitina b não teve resposta em função do manejo da irrigação, fonte e época de aplicação do Se (Figura 8F). A atividade da SOD não foi alterada em função dos tratamentos utilizados (Figura 9A). Na área de sequeiro com utilização de selenato e selenito de sódio aplicados na época vegetativa aumentaram a atividade da enzima CAT, porém aplicando os mesmos tratamentos na época de maturação apenas o selenito de sódio foi capaz de aumentar a atividade da enzima. Na área irrigada, não houve nenhuma resposta à fonte e época de aplicação de Se na atividade da enzima CAT em cana-de-açúcar (Figura 9B).

Na cana de sequeiro, observou-se que tanto o selenato quanto o selenito de sódio aplicados na época vegetativa e na época de maturação foram igualmente eficazes para aumentar a atividade da enzima APX. Por outro lado, no manejo irrigado, observa-se que apenas o selenito estimulou a atividade da enzima APX na cana-de-açúcar (Figura 9C). Já a enzima GR, na cana de sequeiro, teve maior atividade enzimática quanto aplicado selenito de sódio na época da época de maturação. Já na cana irrigada, o selenato teve maior resposta de estimular a atividade enzimática da GR (Figura 9D). No gráfico da Figura 9E e 9F observamos que o selenito de sódio foi capaz de reduzir a concentração de  $H_2O_2$  e MDA na cana de sequeiro quando aplicado na época de maturação da cana-de-açúcar.

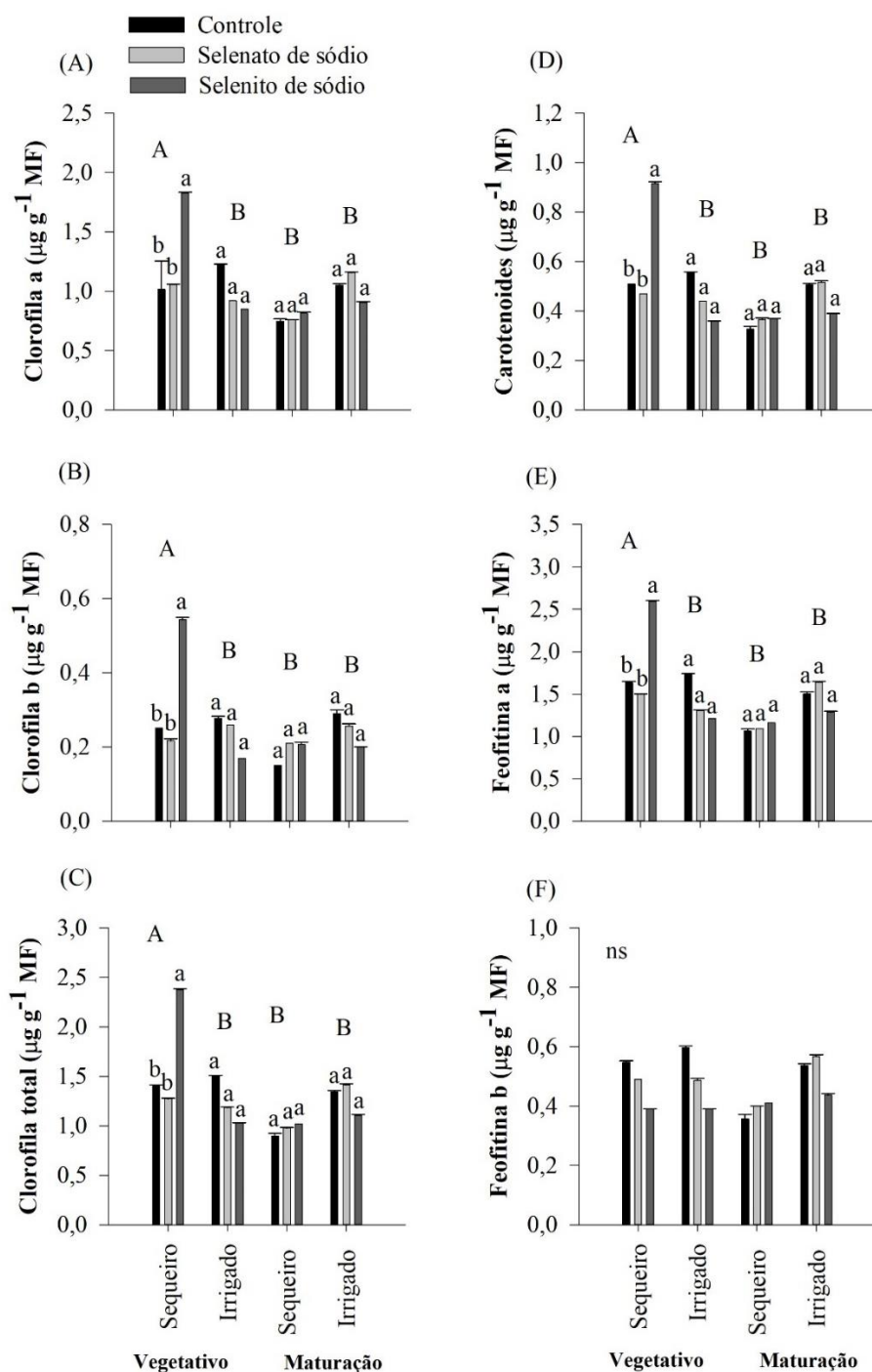


Figura 8 - Clorofila a (A), clorofila b (B), clorofila total (C), carotenoides (D), feofitina a (E) e feofitina b (F) em resposta ao selenato de sódio e selenito aplicados na fase vegetativa e época de maturação de cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as épocas de aplicação de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos com Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 4$  repetições).

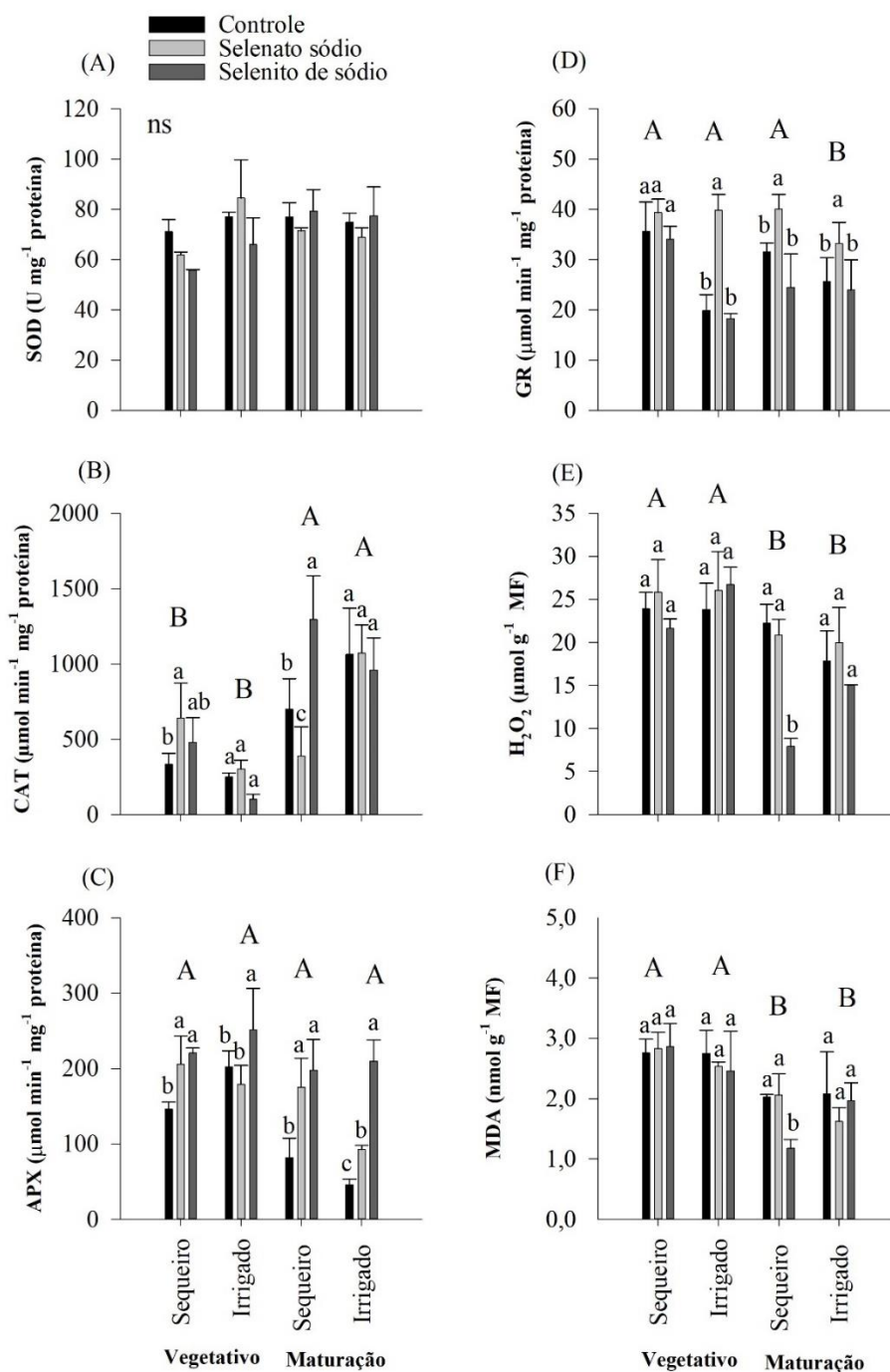


Figura 9 - Atividade enzimática de superóxido dismutase (A), catalase (B), ascorbato peroxidase (C), glutationa redutase (D), peróxido de hidrogênio (E) e malondialdeído (F) em resposta ao selenato de sódio e selenito aplicados na fase vegetativa e pré-colheita de cana de sequeiro e irrigada. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as épocas de aplicação de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos com Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 4$  repetições).

### 3.3 Compostos nitrogenados e açúcares

Na cana-de-açúcar de sequeiro, foi observado que a concentração de proteína solúvel e aminoácidos foi estimulada no tratamento com selenito de sódio aplicado na época vegetativa (Figura 10A e 10B).

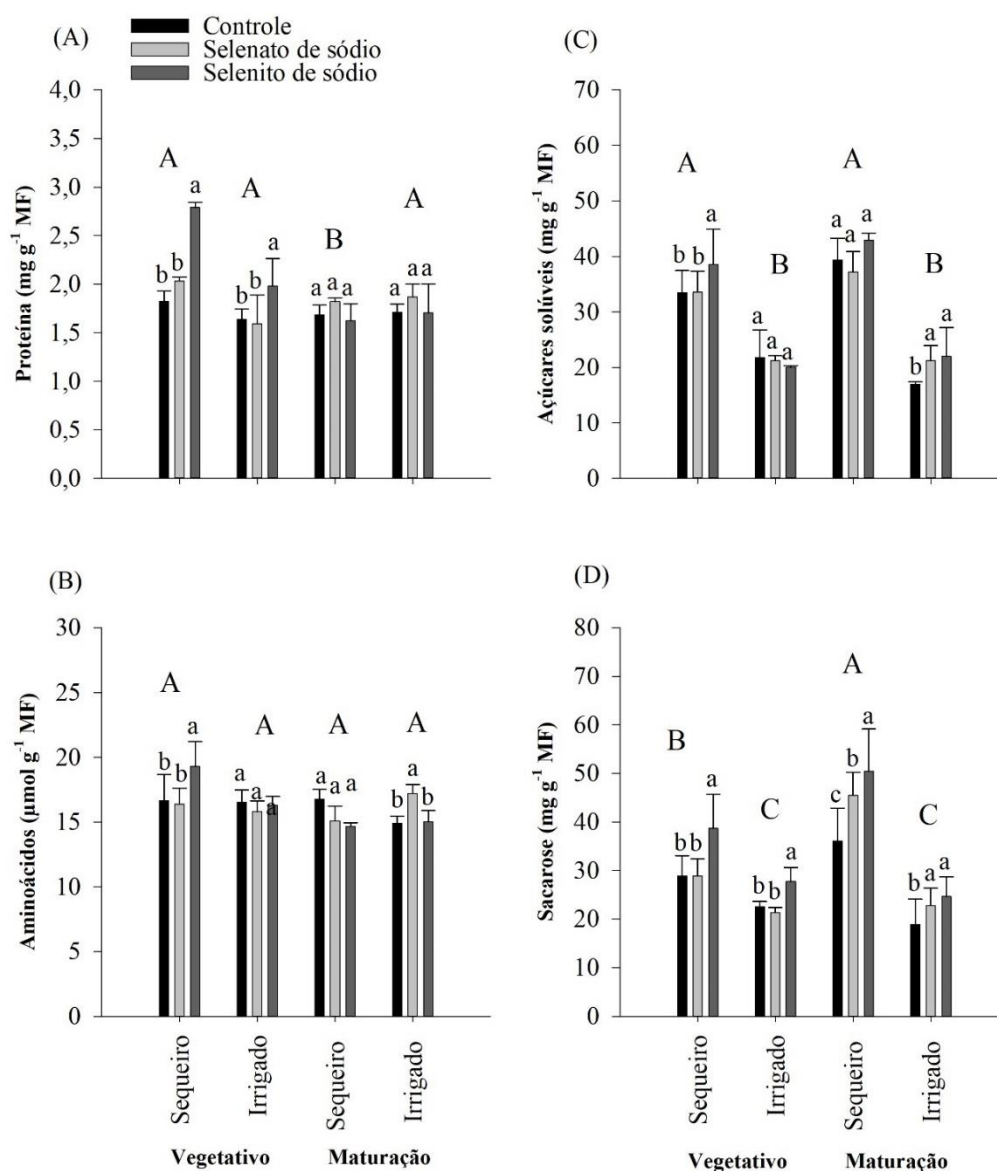


Figura 10 - Concentração de proteína (A), aminoácidos (B), açúcares solúveis (C), sacarose (D) em resposta ao selenato de sódio e selenito aplicados na fase vegetativa e época de maturação da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as épocas de aplicação de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos com Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 4$  repetições).

Na cana irrigada, observa-se que o selenito de sódio aplicado na época vegetativa aumentou a concentração de proteína solúvel na folha e a concentração de aminoácidos foi aumentada quando utilizado selenato de sódio na época de maturação da cana-de-açúcar (Figura 10A e 10B).

A concentração de açúcares solúveis foi aumentada com utilização de selenito de sódio aplicado na época vegetativa de cana-de-açúcar de sequeiro. Já na área irrigada, tanto o selenato quanto o selenito de sódio aumentaram semelhantemente a concentração de açúcares solúveis na quando aplicado na época de maturação da cana-de-açúcar. De modo geral, a concentração de açúcares solúveis foi maior na área de sequeiro do que na área irrigada (Figura 10C).

A concentração de sacarose na folha da cana-de-açúcar foi aumentada quando utilizado selenito de sódio em ambas as épocas de aplicação na cana-de-açúcar cultivada no sequeiro. Já na cana-de-açúcar irrigada, o efeito estimulante na concentração de sacarose foi observado apenas quando aplicado selenito de sódio na época vegetativa. Na cana irrigada, observa-se aumento da concentração de sacarose quando utilizado selenato e selenito de sódio aplicados na época de maturação da cana-de-açúcar (Figura 10D).

### **3.4 Produtividade e qualidade tecnológica**

Os tratamentos utilizados não alteraram o diâmetro do colmo da cana-de-açúcar (Figura 11A), porém o selenato e selenito de sódio aplicados na época de maturação aumentaram a altura da cana-de-açúcar (Figura 11B). O número de perfilhos por metro foi aumentado com selenato e selenito de sódio aplicado em época de maturação da cana de sequeiro, enquanto que na cana irrigada, apenas o selenato de sódio aplicado na época vegetativa foi capaz de aumentar o número de perfilhos por metro (Figura 11C).

O tratamento com Se aumentou a massa do perfilho apenas no manejo irrigado aplicado na fonte de selenito de sódio na época vegetativa. De modo geral, a massa do perfilho foi maior na cana irrigada (Figura 11D). A massa fresca da parte aérea não

foi influenciada pelos tratamentos com Se, sendo observado apenas efeito positivo da irrigação na massa fresca da parte aérea (Figura 11E).

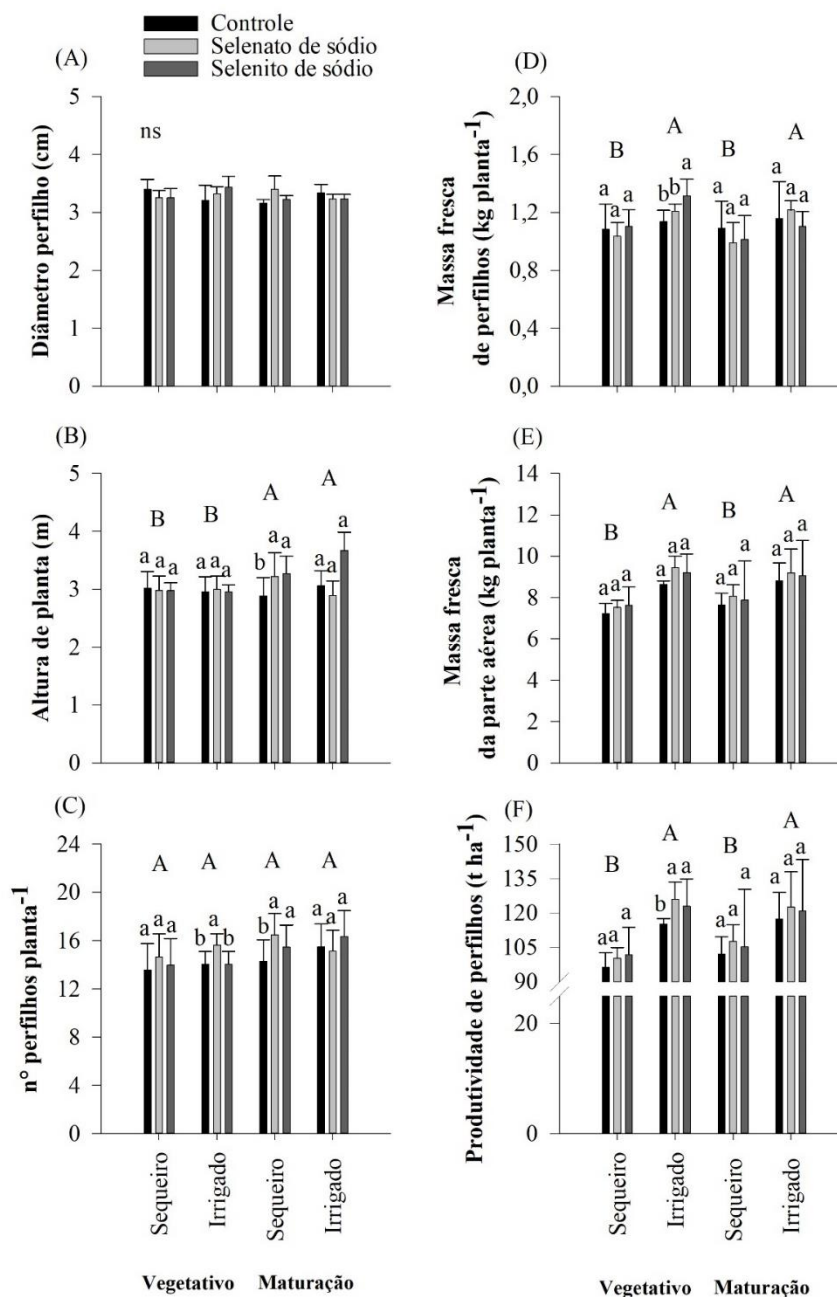


Figura 11 - Diâmetro (A), altura (B), número de perfilhos por planta (C), massa fresca de perfilhos por planta (D), massa fresca da parte aérea (E) e produtividade (F) em resposta ao selenato e selenito de sódio aplicados na fase vegetativa e época de maturação da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as épocas de aplicação de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos com Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 4$  repetições).

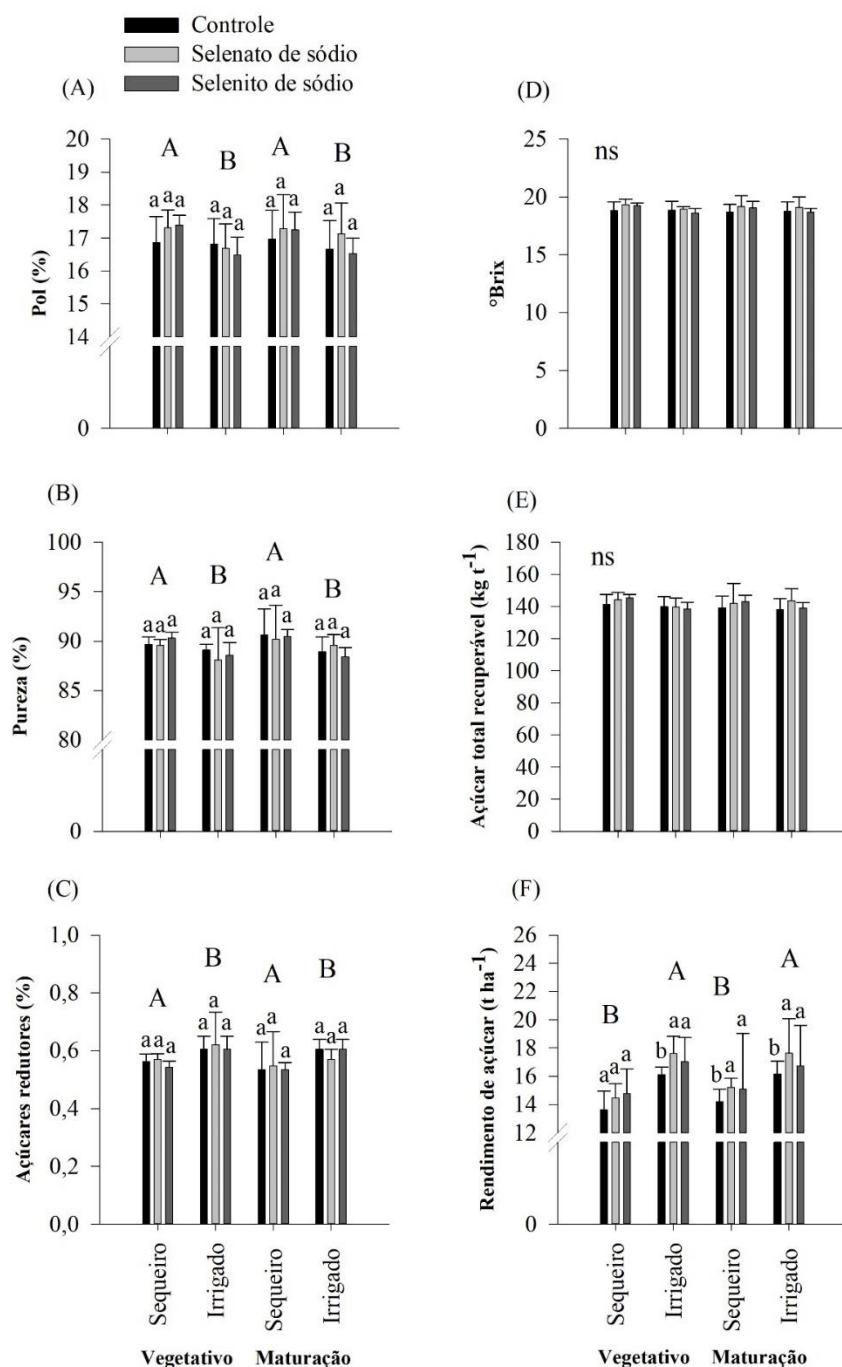


Figura 12 - Porcentagem pol (A), pureza (B), açúcares redutores (C), °brix (D), açúcar total recuperável (E) e açúcar de rendimento (F) em resposta ao selenato de sódio e selenito aplicados na fase vegetativa e época de maturação de cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro. Letras maiúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre as épocas de aplicação de Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas idênticas indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos com Se de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A barra de erro indica o erro padrão da média ( $n = 4$  repetições).

Na Figura 11F observamos que o selenato e selenito de sódio aplicado na época vegetativa aumentaram a produtividade da cana-de-açúcar irrigada, porém esse efeito não foi observado em nenhum dos tratamentos com Se na cana de sequeiro. De modo geral, a cana irrigada teve maior produtividade do que a cana manejada no sequeiro (Figura 11F).

Quanto a qualidade tecnológica, observa-se que os tratamentos variando a fonte e época de aplicação de Se não ocasionaram alterações nas porcentagens de pol, pureza, açúcares redutores, °brix e açúcar recuperável total (Figura 12A, 12B, 12C, 12D e 12E). O selenato e selenito de sódio aplicados na época de maturação aumentaram a produtividade de açúcar em 8% na cana de sequeiro. A cana irrigada também aumentou a produtividade de açúcar quando aplicado o selenato e selenito de sódio tanto na época vegetativa como na época de maturação da cana de açúcar em 7% e 6%, respectivamente (Figura 12F).

### **3.5 Análise de componentes principais**

Na Figura 13 evidencia os principais conjuntos de resposta às doses de selenato e selenito de sódio em cana-de-açúcar aplicado na época vegetativa. Em síntese, observa-se que o tratamento com o selenito em cana de sequeiro promoveu maior número de correlações positivas com variáveis que indicam mitigação do estresse hídrico, como concentração de clorofilas (A, B e total), carotenoides proteína, sacarose e aminoácidos na folha, Pol, °Brix, ATR, concentração de N, concentração e acúmulo de Se. Já em cana irrigada, tanto o selenato quanto o selenito promoveram maior número de correlações positivas com variáveis de aumento do potencial produtivo da cana, como por exemplo, o número e diâmetro de perfilhos, massa fresca da parte aérea, concentração de Se no caldo, produtividade de perfilhos e rendimento de açúcar.





#### 4. DISCUSSÃO

O presente trabalho é o primeiro relato sobre o uso do Se como mitigador de estresse hídrico em cana-de-açúcar demonstrando papel benéfico do elemento em condições de campo. A cana de sequeiro enfrentou um período longo de baixa precipitação pluviométrica e alta evapotranspiração entre julho a setembro de 2021 com balanço hídrico abaixo de 10% no período, perfazendo ao final do ciclo 882 mm (Tabela 3). Por outro lado, a área de cana irrigada foi feita suplementação de modo a atender a demanda hídrica da cultura mesmo no período seco do ano, perfazendo ao final do ciclo com irrigação, o fornecimento de água de 1615 mm (Tabela 4).

Comparativamente, a área irrigada teve produtividade de 19 Mg ha<sup>-1</sup> maior do que a área de sequeiro. Neste cenário, os resultados desse estudo demonstraram claramente que a aplicação de Se é uma importante ferramenta para melhorar o desempenho fotossintético, produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar de modo a mitigar os impactos causados pelo estresse hídrico através do aumento da atividade das enzimas do metabolismo antioxidante. Além disso, demonstramos que o Se também aumenta o potencial agrícola da cana irrigada.

Segundo Zhou et al. (2020) o Se é um elemento que possui estreita faixa de dose benéfica e fitotóxica. Além disso, o Se apresenta interações interiônicas de antagonismo com outros nutrientes (Chen et al., 2022; Guan et al., 2022; Gui et al., 2022b; Pokhrel et al., 2020; Zhang et al., 2019). Todavia, no presente estudo, observamos que as doses de selenato e selenito de sódio demonstraram ser seguras para aplicação foliar em cana-de-açúcar, pois não houve alterações nas concentrações de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Ni, Na, V, Al, Si, Cr, Pb, Co e Cd no tecido foliar e muito menos a presença de sintomas de fitotoxicidade (Figura 5, 6 e 7).

Observamos que houve maior acúmulo de Se na cana de sequeiro quando aplicado na forma de selenito de sódio, enquanto que na área irrigada, o selenato de sódio foi capaz de aumentar a concentração e acúmulo de Se de forma mais expressiva (Figura 4A e 2B). Vários trabalhos têm mostrado que o selenito de sódio é menos translocado do que o selenato de sódio devido ser rapidamente convertido em formas orgânicas, como a selenocisteína (SeMet) e selenometionina (SeCys) (Jiang

et al., 2021; Li et al., 2022). No entanto, em cana-de-açúcar, a translocação e concentração de Se no caldo foi similar entre as duas fontes de Se estudadas com o mesmo comportamento para os dois manejos de irrigação e épocas de aplicação (Figura 4C e 4D).

Nas épocas que foram aplicadas o Se, coincide com o aumento da taxa metabólica para o crescimento (época vegetativa) e de translocação de compostos orgânicos para os colmos (época de maturação) em cana-de-açúcar. Após a rápida conversão do selenito a SeMet e SeCys no tecido foliar da cana-de-açúcar, devido às condições de alta demanda metabólica para o crescimento da cana-de-açúcar e translocação de compostos para os colmos na época de maturação, ocorre estímulo da translocação do Se presente no tecido foliar para o colmo, o que resultou na porcentagem de translocação de Se muito similar entre o selenito e selenato de sódio. A translocação de Se nas plantas é muito similar ao enxofre. Após a assimilação de Se nas folhas, o Se é translocado para os drenos metabólicos mediados por relações fonte-dreno na forma de SeMet e SeCys exclusivamente via floema (Carey et al., 2012; Marques et al., 2021; Poblaciones et al., 2014; Wu et al., 2015).

É sabido que o estresse hídrico promove aumento anormal de espécies reativas de oxigênio (EROS), como o ânion superóxido ( $O_2^{\cdot-}$ ), peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), radical livre hidroxila ( $OH\cdot$ ), oxigênio singlete ( $^1O_2$ ), radical metil ( $CH_3\cdot$ ) e radicais livres de peroxidação lipídica ( $LOO\cdot$ ,  $ROO\cdot$ ). Essas ROS degradam biomoléculas vitais para o crescimento e desenvolvimento normal das plantas, tais como: DNA, RNA, proteínas lipídeos e clorofila (Irato e Santovito, 2021; Sachdev et al., 2021).

No presente trabalho, observamos que o selenito de sódio aumentou a atividade da enzima CAT e APX na cana de sequeiro aplicado na época vegetativa e época de maturação (Figura 9B e 9C), reduzindo  $H_2O_2$  e MDA com uso do selenito de sódio, principalmente quando aplicado na época de maturação (Figura 9E e 9F). Essas enzimas são responsáveis pela dismutação do  $H_2O_2$  em água e oxigênio, sendo que a APX utiliza o ascorbato como doador de elétrons, visando a detoxificação de EROS e defesa vegetal (Carcia-Caparrós et al., 2019; García-Caparrós et al., 2021).

Além disso, o selenito de sódio aumentou a concentração de carotenoides e feofitina na cana de sequeiro (Figura 8D e 8E). Diversos autores observaram que os

carotenoides atuam como pigmentos fotoprotetores que aumenta a eficiência fotoquímica do complexo antena de plantas sob estresse. Já a feofitina é um importante pigmento responsável por dissipar o excesso de energia, evitando processos de fotoinibição e fotooxidação da clorofila em plantas sob estresse. Resultados semelhantes foram obtidos por Mateus et al. (2021) que observaram que o Se aumentou a concentração de clorofila a, clorofila b, carotenoides e feofitina em plantas de café.

O selenito de sódio foi capaz de aumentar a concentração de pigmentos fotossintetizantes na cana-de-açúcar de sequeiro aplicado no período vegetativo, promovendo aumento na concentração de clorofila a, clorofila b, clorofila total (Figura 8). O aumento da atividade antioxidante enzimática e não enzimática da cana de sequeiro tratada com selenito de sódio resultou na preservação de biomoléculas essenciais, tais como os pigmentos fotossintetizantes. Dessa forma, os efeitos benéficos do selenito de sódio aplicado na época vegetativa sobre a preservação dos pigmentos fotossintéticos resultaram no aumento da concentração de açúcares solúveis e sacarose na folha da cana de sequeiro (Figura 10C e 10D). Resultados semelhantes foram obtidos com uso de Se em feijão caupi (Silva et al., 2020), amendoim (Cunha et al., 2022) e café (Mateus et al., 2021), evidenciando o papel do Se para mitigar o estresse oxidativo por meio do estímulo do metabolismo antioxidante (enzimático e não enzimático), visando preservar a atividade fotossintética, biossíntese de açúcares, crescimento e produtividade das culturas sob estresse.

Quanto ao crescimento da cana-de-açúcar de sequeiro foi possível observar que tanto o selenato quanto o selenito de sódio aplicados na época de maturação promoveram aumento do tamanho da planta e do número de perfilhos (Figura 11B e 11C). Adicionalmente, o selenato e selenito aplicados na época vegetativa demonstraram ser capazes de potencializar a produtividade da cana-de-açúcar irrigada (Figura 11E e 11F). Os efeitos combinados do estímulo do metabolismo antioxidante e regulação da biossíntese de pigmentos fotoprotetores, auxilia as plantas na homeostase de energia metabólica para os processos fisiológicos essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas, gerando tolerância a condições de estresse ambiental (Han et al., 2022; Morales-Espinoza et al., 2019; Saeedi et al., 2021; Shalaby et al., 2017; Shekari et al., 2019; Silva et al., 2021).

Além disso, o Se potencializa esses efeitos benéficos combinados de forma a aumentar o potencial produtivo das culturas agrícolas cultivadas em condições normais (Lanza et al., 2021).

Os tratamentos com Se na cana-de-açúcar se mostraram como uma alternativa sólida para mitigar o estresse hídrico e potencializar a produtividade em áreas irrigadas, pois foi possível demonstrar que na cana de sequeiro os tratamentos com Se promoveram incremento na produtividade de açúcar quando realizado o tratamento na época de maturação (Figura 12F). Já na cana irrigada, ambos os momentos de aplicação de Se resultaram em maior produtividade de açúcar na colheita (Figura 12F). É bem conhecido que o Se é considerado um elemento benéfico das plantas superiores, que pode aumentar o metabolismo antioxidante, fotossíntese, metabólitos secundários e carboidratos nas folhas das plantas (Hasanuzzaman et al., 2020; Khalil et al., 2022; Li et al., 2020; Silva et al., 2020). A aplicação de baixa concentração de Se pode melhorar o processo fotossintético, aumentando a produção de clorofila, a condutância estomática e a concentração interna de CO<sub>2</sub> (Afzal et al., 2022; Elsheery et al., 2020; Han et al., 2022; Karimi et al., 2020; Rady et al., 2020; Ribeiro et al., 2016). Geralmente, a aplicação de Se está associado ao aumento da biossíntese de açúcares nos órgãos fonte de diferentes culturas agrícolas, tais como: arroz (Bhadwal e Sharma, 2022), trigo (Lara et al., 2019), café (Mateus et al., 2021), feijão-caupi (Silva et al., 2021, 2019), batata (Zhang et al., 2021), amendoim (Cunha et al., 2022), brócolis (Gui et al., 2022a) e milho (Khalil et al., 2022). O aumento de açúcares não se restringe apenas às folhas, mas também com contribuições ao final do ciclo das culturas pela translocação de fotoassimilados para os órgãos dreno, como os grãos, inflorescências e tubérculos (Lanza e Reis, 2021).

O uso de aplicações foliares com nutrientes-chave no processo de maturação em cana-de-açúcar é uma estratégia muito relevante para o setor porque o rendimento de açúcar é o principal alvo da agroindústria, que tem como objetivo aumentar a biossíntese de sacarose nas folhas e promover a translocação do fotoassimilado para os colmos na etapa de maturação (Majeed et al., 2022).

Na cultura da cana-de-açúcar existem diversos trabalhos utilizando adubações foliares previamente à colheita visando aumento da translocação de açúcar ao final do estágio de maturação. Dentre os nutrientes estudados, estão principalmente o Mg,

P e B que são elementos-chave no processo de translocação e acúmulo de sacarose no colmo. Segundo Garcia et al. (2020), em condições controladas, observaram que plantas jovens de cana-de-açúcar tratadas com Mg na solução nutritiva aumentaram em 87% a porcentagem de sacarose nos perfilhos. De acordo com Oliveira et al. (2022), houve aumento de 10% de açúcar no perfilho de cana-de-açúcar com fornecimento de fósforo via solo. Mangrio et al. (2020) observaram aumento de 2% no teor de brix da cana-de-açúcar com aplicação foliar de B.

Observamos efeito promotor de sacarose do Se em cana-de-açúcar pela sua capacidade de potencializar a fotossíntese pela regulação da biossíntese de pigmentos acessórios que aumenta a eficiência fotoquímica em condições de estresse hídrico e irrigado. No processo de maturação da cana-de-açúcar, a sacarose extra produzida devido a atuação do Se na fisiologia da cana-de-açúcar aumenta o acúmulo de sacarose no colmo na etapa de maturação, agregando maior qualidade da matéria prima ao final do processo agroindustrial. Esse efeito é observado tanto em cana de sequeiro quanto em cana irrigada.

## **5. CONCLUSÃO**

A aplicação foliar de selenito de sódio na época vegetativa mitiga o estresse hídrico em cana-de-açúcar através do estímulo da biossíntese de pigmentos fotossintetizantes (clorofilas) e pigmentos de fotoproteção (carotenoides) que resultou no maior acúmulo de sacarose na folha e no colmo (°brix, pol, ATR). Na época de maturação, o melhor tratamento para mitigar o estresse hídrico foi o selenato que atuou como agente antioxidante reduzindo EROs e peroxidação lipídica.

Em cana irrigada, a aplicação na época vegetativa de ambas as fontes de Se são eficazes para aumentar o potencial produtivo da cultura através do aumento do número e diâmetro de perfilhos, massa fresca da parte aérea, produtividade de perfilhos e rendimento de açúcar. Na época de maturação, apenas o selenato teve resposta positiva na cana irrigada, aumentando a concentração de clorofilas (A, B e total) e feofitina (A e B) na folha.

. Dessa forma, fica claro que o Se aumenta a tolerância da cana de sequeiro ao estresse hídrico e melhora o potencial produtivo da cana irrigada.

## 6. REFERÊNCIAS

Afzal B, Naaz H, Sami N, Yasin D, Khan NJ, Fatma T (2022) Mitigative effect of biosynthesized SeNPs on cyanobacteria under paraquat toxicity. **Chemosphere** 293:133562. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133562>

Alexieva V, Sergiev I, Mapelli S, Karanov E (2001) The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell Environmental** 24:1337–1344. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x>

Aqib M, Nawaz F, Majeed S, Ghaffar A, Ahmad KS, Shehzad MA, Tahir MN, Aurangzaib M, Javeed HMR, Habib-ur-Rahman M, Usmani MM (2021) Physiological insights into sulfate and selenium interaction to improve drought tolerance in mung bean. **Physiology Molecular Biology Plants** 27:1073–1087. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-00992-6>

Ashwin Narayan J, Chakravarthi M, Nerkar G, Manoj VM, Dharshini S, Subramonian N, Premachandran MN, Arun Kumar R, Krishna Surendar K, Hemaprabha G, Ram B, Appunu C (2021) Overexpression of expansin EaEXPA1, a cell wall loosening protein enhances drought tolerance in sugarcane. **Industrial Crops Production** 159:113035. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113035>

Azevedo, Ricardo Antunes; Alas, R. M.; Smith, R. J.; Lea PL (1998) Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley. **Physiology Plant** 104:280–292

Bhadwal S, Sharma S (2022) Selenium Alleviates Carbohydrate Metabolism and Nutrient Composition in Arsenic Stressed Rice Plants. **Rice Science** 29:385–396. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2021.11.008>

Bradford, MM. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytic Biochemistry** 72:248–259. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3).

Carcia-Caparrós P, Hasanuzzaman M, Lao M (2019) Oxidative stress and antioxidant defense in plants under drought conditions. **Plant Abiotic Stress**

**Tolerance Agronomy Molecular Biotechnology Approaches** 1:207–219.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0_9)

Carey AM, Scheckel KG, Lombi E, Newville M, Choi Y, Norton GJ, Price AH, Meharg AA (2012) Grain accumulation of selenium species in rice (*Oryza sativa* L.). **Environmental Science Technology** 46:5557–5564.  
<https://doi.org/10.1021/es203871j>

Chen Y, Gao Y, Wu S, Zhang L, Wang Q, Yao X, Gao H (2022) Wet deposition of atmospheric selenium and sensitivity to emission and precipitation patterns. **Science Total Environmental** 835:155402.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155402>

Consecana. **Manual de Instruções**. (2006). Piracicaba: Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo, 5. Ed., 111 p.

Cui Y, Ouyang S, Zhao Y, Tie L, Shao C, Duan H (2022) Plant responses to high temperature and drought: A bibliometrics analysis. **Frontiers Plant Science** 13.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1052660>

Cunha MLO, Oliveira LCA de, Silva VM, Montanha GS, Reis AR dos (2022) Selenium increases photosynthetic capacity, daidzein biosynthesis, nodulation and yield of peanuts plants (*Arachis hypogaea* L.). **Plant Physiology Biochemistry** 190:231–239. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.08.006>

da Fonseca M de C, Bossolani JW, de Oliveira SL, Moretti LG, Portugal JR, Scudeletti D, de Oliveira EF, Crusciol CAC (2022) *Bacillus subtilis* Inoculation Improves Nutrient Uptake and Physiological Activity in Sugarcane under Drought Stress. **Microorganisms** 10. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040809>

Dubois M, Gilles K, Hamilton JK, Rebers PA, Smith F (1951) A colorimetric method for the determination of sugars. **Nature** 168:167.  
<https://doi.org/10.1038/168167a0>

El-Badri AM, Batool M, Mohamed IAA, Wang Z, Wang C, Tabl KM, Khatab A, Kuai J, Wang J, Wang B, Zhou G (2022) Mitigation of the salinity stress in rapeseed (*Brassica napus* L.) productivity by exogenous applications of bio-selenium nanoparticles during the early seedling stage. **Environmental Pollution** 310.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119815>

Elsheery NI, Sunoj VSJ, Wen Y, Zhu JJ, Muralidharan G, Cao KF (2020) Foliar application of nanoparticles mitigates the chilling effect on photosynthesis and photoprotection in sugarcane. **Plant Physiology Biochemistry** 149:50–60. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.035>

García-Caparrós P, De Filippis L, Gul A, Hasanuzzaman M, Ozturk M, Altay V, Lao MT (2021) Oxidative Stress and Antioxidant Metabolism under Adverse Environmental Conditions: a Review. **Botanical Review** 87:421–466. <https://doi.org/10.1007/s12229-020-09231-1>

Garcia A, Crusciol CAC, McCray JM, Nascimento CAC, Martello JM, de Siqueira GF, Tarumoto MB (2020) Magnesium as a Promoter of Technological Quality in Sugarcane. **Journal Soil Science Plant Nutrition** 20:19–30. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00096-x>

Garcia Tavares R, Lakshmanan P, Peiter E, O'Connell A, Caldana C, Vicentini R, Soares JS, Menossi M (2018) ScGAI is a key regulator of culm development in sugarcane. **Journal Experimental Botany** 69:3823–3837. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery180>

Giannopolitis, C. N.; Ries SK (1977) Superoxide dismutases. I Occurrence in higher plants. **Plant Physiology** 59:309–314. <https://doi.org/10.1080/09553008314551231>

Gilani H, Sahebi H, Oliveira F (2020) Sustainable sugarcane-to-bioethanol supply chain network design: A robust possibilistic programming model. **Applied Energy** 278:115653. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115653>

Gomes-Junior RA, Moldes CA, Delite FS, Pompeu GB, Gratão PL, Mazzafera P, Lea PJ, Azevedo RA (2006) Antioxidant metabolism of coffee cell suspension cultures in response to cadmium. **Chemosphere** 65:1330–1337. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.04.056>

Guan DX, Dai ZH, Sun HJ, Ma LQ (2022) Arsenic and selenium in the plant-soil-human ecosystem: CREST publications during 2018–2021. **Critical Review Environmental Science Technology** 52:3567–3572. <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.2010836>

Gui JY, Rao S, Gou Y, Xu F, Cheng S (2022a) Comparative study of the effects of selenium yeast and sodium selenite on selenium content and nutrient quality in

broccoli florets (*Brassica oleracea* L. var. *italica*). **Journal Science Food Agriculture** 102:1707–1718. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11511>

Gui JY, Rao S, Huang X, Liu X, Cheng S, Xu F (2022b) Interaction between selenium and essential micronutrient elements in plants: A systematic review. **Science Total Environmental** 853:158-173. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158673>

Han D, Tu S, Dai Z, Huang W, Jia W, Xu Z, Shao H (2022) Comparison of selenite and selenate in alleviation of drought stress in *Nicotiana tabacum* L. **Chemosphere** 287:132136. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132136>

Hasanuzzaman M, Bhuyan MHMB, Raza A, Hawrylak-Nowak B, Matraszek-Gawron R, Mahmud J Al, Nahar K, Fujita M (2020) Selenium in plants: Boon or bane? **Environmental Experimental Botany** 178. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104170>

Heath, L. R.; Packer L (1968) Photoperoxidation in isolated Chloroplasts of Fatty Acid Peroxidation In 1965 we observed that isolated chloroplasts upon illumination produce substances which react with thiobarbituric signify An investigation has therefore been under- Isolated should. **Biochemistry Biophysical** 125:189–198

Hemaprabha G, Swapna S, Lavanya DL, Sajitha B, Venkataramana S (2013) Evaluation of Drought Tolerance Potential of Elite Genotypes and Progenies of Sugarcane (*Saccharum* sp. hybrids). **Sugar Tech** 15:9–16. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0182-9>

Irato P, Santovito G (2021) Enzymatic and non-enzymatic molecules with antioxidant function. **Antioxidants** 10. <https://doi.org/10.3390/antiox10040579>

Jiang H, Lin W, Jiao H, Liu J, Chan L, Liu X, Wang R, Chen T (2021) Uptake, transport, and metabolism of selenium and its protective effects against toxic metals in plants: a review. **Metallomics** 13:1–11. <https://doi.org/10.1093/mtomcs/mfab040>

Karimi R, Ghabooli M, Rahimi J, Amerian M (2020) Effects of foliar selenium application on some physiological and phytochemical parameters of *Vitis vinifera* L. cv. Sultana under salt stress. **Journal Plant Nutrition** 43:2226–2242. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1766072>

Khalil R, Yusuf M, Bassuony F, Haroun S, Gamal A (2022) Alpha-tocopherol reinforce selenium efficiency to ameliorates salt stress in maize plants through carbon

metabolism, enhanced photosynthetic pigments and ion uptake. **South African Journal Botany** 144:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.08.033>

Lanza MGDB, Reis AR dos (2021) Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. **Plant Physiology Biochemistry** 164:27–43. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.026>

Lara TS, Lessa JH de L, de Souza KRD, Corguinha APB, Martins FAD, Lopes G, Guilherme LRG (2019) Selenium biofortification of wheat grain via foliar application and its effect on plant metabolism. **Journal of Food Composition and Analysis** 81:10–18. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.05.002>

Li J, Liu R, Zhang C, Yang J, Lyu L, Shi Z, Man YB, Wu F (2022) Selenium uptake and accumulation in winter wheat as affected by level of phosphate application and arbuscular mycorrhizal fungi. **Journal Hazard Materials** 433:128762. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128762>

Li Y, Zhu N, Liang X, Zheng L, Zhang C, Li YF, Zhang Z, Gao Y, Zhao J (2020) A comparative study on the accumulation, translocation and transformation of selenite, selenate, and SeNPs in a hydroponic-plant system. **Ecotoxicology Environmental Safety** 189:109955. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109955>

Lichtenthaler Hk, Wellburn Ar (1983) Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. **Biochemical Society Transactions** 11:591–592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>

Liu K, Li S, Han J, Zeng X, Ling M, Mao J, Li Y, Jiang J (2021) Effect of selenium on tea (*Camellia sinensis*) under low temperature: Changes in physiological and biochemical responses and quality. **Environmental Experimental Botany** 188:104475. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104475>

Luís Oliveira Cunha M, de Mello Prado R (2023) Synergy of Selenium and Silicon to Mitigate Abiotic Stresses: a Review. **Gesunde Pflanz.** <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00826-9>

Luo H, Xing P, Liu J, Pan S, Tang X, Duan M (2021) Selenium improved antioxidant response and photosynthesis in fragrant rice (*Oryza sativa* L.) seedlings during drought stress. **Physiology Molecular Biology Plants** 27:2849–2858. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-01117-9>

Mahadevaiah C, Hapase P, Sreenivasa V, Hapase R, Swamy HKM, Anilkumar C, Mohanraj K, Hemaprabha G, Ram B (2021) Delineation of genotype x environment interaction for identification of stable genotypes for tillering phase drought stress tolerance in sugarcane. **Scientif Report** 11:1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98002-y>

Majeed A, Rashid I, Niaz A, Ditta A, Sameen A, Al-Huqail AA, Siddiqui MH (2022) Balanced Use of Zn, Cu, Fe, and B Improves the Yield and Sucrose Contents of Sugarcane Juice Cultivated in Sandy Clay Loam Soil. **Agronomy** 12. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030696>

Mangrio N, Kandhro MN, Soomro AA, Mari N, Shah Z ul H (2020) Growth, yield and sucrose percent response of sugarcane to zinc and boron application. **Sarhad Journal of Agriculture** 36:459–469. <https://doi.org/10.17582/JOURNAL.SJA/2020/36.2.459.469>

Marques AC, Pessoa CC, Coelho ARF, Luís IC, Daccak D, Campos PS, Simões M, Almeida AS, Pessoa MF, Reboredo FH, Guerra M, Leitão RG, Ramalho JC, Marques P, Silva MM, Legoinha P, Pais IP, Lidon F (2021) Rice (*Oryza sativa* L.) Biofortification with Selenium: Enrichment Index and Interactions among Nutrients. **Biology and Life Sciences** 39:1-14. <https://doi.org/10.3390/iecps2020-08701>

Mateus MP de B, Tavanti RFR, Tavanti TR, Santos EF, Jalal A, Reis AR dos (2021) Selenium biofortification enhances ROS scavenge system increasing yield of coffee plants. **Ecotoxicology Environmental Safety** 209:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111772>

Moldes CA, Medici LO, Abrahão OS, Tsai SM, Azevedo RA (2008) Biochemical responses of glyphosate resistant and susceptible soybean plants exposed to glyphosate. **Acta Physiology Plant** 30:469–479. <https://doi.org/10.1007/s11738-008-0144-8>

Morales-Espinoza MC, Cadenas-Pliego G, Pérez-Alvarez M, Hernández-Fuentes AD, De La Fuente MC, Benavides-Mendoza A, Valdés-Reyna J, Juárez-Maldonado A (2019) Se nanoparticles induce changes in the growth, antioxidant responses, and fruit quality of tomato developed under nacl stress. **Molecules** 24. <https://doi.org/10.3390/molecules24173030>

Moullick D, Ghosh D, Mandal J, Bhowmick S, Mondal D, Choudhury S, Santra SC, Vithanage M, Biswas JK (2023) A cumulative assessment of plant growth stages and selenium supplementation on arsenic and micronutrients accumulation in rice grains. **Journal Clean Production** 386:135764. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135764>

Oliveira CLB de, Cassimiro JB, Lira MV da S, Boni A da S, Donato N de L, Reis R dos A, Heinrichs R (2022) Sugarcane Ratoon Yield and Soil Phosphorus Availability in Response to Enhanced Efficiency Phosphate Fertilizer. **Agronomy** 12:2817. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112817>

Ortiz-Bobea A, Ault TR, Carrillo CM, Chambers RG, Lobell DB (2021) Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. **Nature Climate Change** 11:306–312. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1>

Patnaik GP, Monisha V, Thavaprakash N, Djanaguiraman M, Sachin S, Mrunalini K, Srinivasan G, Naik MA, Varshini S V, Sathagiri S (2023) Selenium Application Improves Drought Tolerance during Reproductive Phase of Rice. **Sustainability** 30:1–13

Perfileva AI, Graskova IA, Sukhov BG, Krutovsky K V. (2022) Effect of Selenium Nanocomposites Based on Natural Polymer Matrices on the Biomass and Storage of Potato Tubers in a Field Experiment. **Agronomy** 12. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061281>

Poblaciones MJ, Rodrigo S, Santamaría O, Chen Y, McGrath SP (2014) Agronomic selenium biofortification in *Triticum durum* under Mediterranean conditions: From grain to cooked pasta. **Food Chemical** 146:378–384. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.070>

Pokhrel GR, Wang KT, Zhuang HM, Wu YC, Chen W, Lan Y, Zhu X, Li Z, Fu FF, Yang G Di (2020) Effect of selenium in soil on the toxicity and uptake of arsenic in rice plant. **Chemosphere** 239:124712. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124712>

Rabelo SC, Paiva LBB de, Pin TC, Pinto LFR, Tovar LP, Nakasu PYS (2019) Chemical and energy potential of sugarcane. Elsevier Inc.

Rady MM, Belal HEE, Gadallah FM, Semida WM (2020) Selenium application in two methods promotes drought tolerance in *Solanum lycopersicum* plant by inducing

the antioxidant defense system. **Scientia Horticulture** 266:109290. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109290>

Raij, B. van; Andrade, J.C.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. (2001). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas Instituto Agrônômico. 285p.

Rasool A, Shah WH, Mushtaq NU, Saleem S, Hakeem KR, ul Rehman R (2022) Amelioration of salinity induced damage in plants by selenium application: A review. **South African Journal Botany** 147:98–105. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.12.029>

Reyes JAO, Carpennero AS, Santos PJA, Delfin EF (2020) Effects of water regime, genotype, and formative stages on the agro-physiological response of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) to drought. **Plants** 9. <https://doi.org/10.3390/plants9050661>

Ribeiro DM, Silva Júnior DD, Cardoso FB, Martins AO, Silva WA, Nascimento VL, Araújo WL (2016) Growth inhibition by selenium is associated with changes in primary metabolism and nutrient levels in *Arabidopsis thaliana*. **Plant Cell Environmental** 39:2235–2246. <https://doi.org/10.1111/pce.12783>

Ribeiro R V., MacHado RS, MacHado EC, MacHado DFSP, Magalhães Filho JR, Landell MGA (2013) Revealing drought-resistance and productive patterns in sugarcane genotypes by evaluating both physiological responses and stalk yield. **Experimental Agriculture** 49:212–224. <https://doi.org/10.1017/S0014479712001263>

Sachdev S, Ansari SA, Ansari MI, Fujita M, Hasanuzzaman M (2021) Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. **Antioxidants** 10:1–37. <https://doi.org/10.3390/antiox10020277>

Saeedi M, Soltani F, Babalar M, Izadpanah F, Wiesner-Reinhold M, Baldermann S (2021) Selenium Fortification Alters the Growth, Antioxidant Characteristics and Secondary Metabolite Profiles of Cauliflower (*Brassica oleracea* var. botrytis) Cultivars in Hydroponic Culture. **Plants** 10:1537. <https://doi.org/10.3390/plants10081537>

Saleem M, Fariduddin Q (2022) Novel mechanistic insights of selenium induced microscopic, histochemical and physio-biochemical changes in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. An account of beneficiality or toxicity. **Journal Hazard Materials** 434. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128830>

Sardari M, Rezayian M, Niknam V (2022) Comparative Study for the Effect of Selenium and Nano-Selenium on Wheat Plants Grown under Drought Stress. **Russian Journal Plant Physiology** 69. <https://doi.org/10.1134/S102144372206022X>

Scudeletti D, Crusciol CAC, Bossolani JW, Moretti LG, Momesso L, Servaz Tubaña B, de Castro SGQ, De Oliveira EF, Hungria M (2021) Trichoderma asperellum Inoculation as a Tool for Attenuating Drought Stress in Sugarcane. **Frontiers Plant Science** 12:1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.645542>

Selvi A, Devi K, Manimekalai R, Prathima PT (2020) Comparative analysis of drought-responsive transcriptomes of sugarcane genotypes with differential tolerance to drought. **Biotechnology** 10:1–14. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02226-0>

Shalaby T, Bayoumi Y, Alshaal T, Elhawat N, Sztrik A, El-Ramady H (2017) Selenium fortification induces growth, antioxidant activity, yield and nutritional quality of lettuce in salt-affected soil using foliar and soil applications. **Plant Soil** 421:245–258. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3458-8>

Shalaby TA, Abd-alkarim E, El-Aidy F, Hamed ES, Sharaf-Eldin M, Taha N, El-Ramady H, Bayoumi Y, dos Reis AR (2021) Nano-selenium, silicon and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> boost growth and productivity of cucumber under combined salinity and heat stress. **Ecotoxicology Environmental Safety** 212. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111962>

Shekari L, Aroiee H, Mirshekari A, Nemati H (2019) Protective role of selenium on cucumber (*Cucumis sativus* L.) exposed to cadmium and lead stress during reproductive stage role of selenium on heavy metals stress. **Journal Plant Nutrition** 42:529–542. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1554075>

Silva VM, Boleta EHM, Lanza MGDB, Lavres J, Martins JT, Santos EF, dos Santos FLM, Putti FF, Junior EF, White PJ, Broadley MR, Carvalho HWP de, Reis AR dos (2018) Physiological, biochemical, and ultrastructural characterization of selenium toxicity in cowpea plants. **Environmental Experimental Botany** 150:172–182. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.020>

Silva VM, Boleta EHM, Martins JT, dos Santos FLM, da Rocha Silva AC, Alcock TD, Wilson L, de Sá ME, Young SD, Broadley MR, White PJ, dos Reis AR (2019) Agronomic biofortification of cowpea with selenium: effects of selenate and selenite

applications on selenium and phytate concentrations in seeds. **Journal Science Food Agriculture** 99:5969–5983. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9872>

Silva VM, Nardeli AJ, Mendes NAC, Alcock TD, Rocha M de M, Putti FF, Wilson L, Young SD, Broadley MR, White PJ, Reis AR dos (2021) Application of sodium selenate to cowpea (*Vigna unguiculata* L.) increases shoot and grain Se partitioning with strong genotypic interactions. **Journal Trace Element Medicinal Biology** 67. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2021.126781>

Silva VM, Rimoldi Tavanti RF, Gratão PL, Alcock TD, Reis AR dos (2020) Selenate and selenite affect photosynthetic pigments and ROS scavenging through distinct mechanisms in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) walp) plants. **Ecotoxicology Environmental Safety** 201:110777. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110777>

van Handel E (1968) Direct microdetermination of sucrose. **Analytical Biochemistry** 22:280–283. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(68\)90317-5](https://doi.org/10.1016/0003-2697(68)90317-5)

Wu Z, Bañuelos GS, Lin ZQ, Liu Y, Yuan L, Yin X, Li M (2015) Biofortification and phytoremediation of selenium in China. **Frontiers Plant Science** 6:1–8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00136>

Xu S, Wang J, Shang H, Huang Y, Yao W, Chen B, Zhang M (2018) Transcriptomic characterization and potential marker development of contrasting sugarcane cultivars. **Scientific Report** 8:1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19832-x>

Yadav S, Sharma S, Sharma KD, Dhansu P, Devi S, Preet K, Ahlawat P, Kamboj P, Rani P, Rani B, Kaushik P, Kumar A (2023) Selenium Mediated Alterations in Physiology of Wheat under Different Soil Moisture Levels. **Sustainability** 15:1771. <https://doi.org/10.3390/su15031771>

Yemm EW, Cocking EC, Ricketts RE (1955) The determination of amino-acids with ninhydrin. **Analyst** 80:209–214. <https://doi.org/10.1039/AN9558000209>

Zhang H, Zhao Z, Nie B, Lyu C, Liu X (2021) Selenium loss and changes in product quality during cooking of selenium enriched potato tubers. **Journal of Food Composition and Analysis** 96:103728. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103728>

Zhang H, Zhao Z, Zhang X, Zhang W, Huang L, Zhang Z, Yuan L, Liu X (2019) Effects of foliar application of selenate and selenite at different growth stages on

Selenium accumulation and speciation in potato (*Solanum tuberosum* L.). **Food Chemistry** 286:550–556. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.185>

Zhou X, Yang J, Kronzucker HJ, Shi W (2020) Selenium Biofortification and Interaction With Other Elements in Plants: A Review. **Frontiers Plant Science** 11:1–18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.586421>.

## **CAPÍTULO 5 – Considerações finais**

O presente trabalho é um dos pioneiros acerca do uso do Se na cana-de-açúcar que consta a curva de dose resposta do selenato e selenito de sódio para esclarecimento quanto a faixa de dose (benéfica a fitotóxica) a ser utilizada na cana-de-açúcar. Os resultados da presente tese trouxeram à luz quanto as respostas benéficas do elemento em cana-de-açúcar, de modo a vislumbrar os mecanismos de resposta do elemento no metabolismo da cana-de-açúcar. Além disso, alguns esclarecimentos foram descritos acerca dos efeitos fitotóxicos relacionas as doses elevadas de selenato e selenito de sódio.

Os resultados do presente trabalho evidenciam que o Se pode ser explorado pelo setor sucroenergético para aplicação na lavoura visando mitigação do estresse hídrico e também para aumentar o potencial produtivo da cana irrigada.

Embora sejam resultados animadores, faz-se necessário estudos adicionais para melhor compreender o manejo do Se em cana-de-açúcar, como por exemplo: uso de Se em aplicações sequenciais, utilização de nanopartículas de Se, aplicação de Se-orgânico, respostas da adubação foliar em outros genótipos, aplicação de Se associado a outros agentes antiestresse (extrato de alga, aminoácidos, micronutrientes), utilização do Se para mitigar outros estresses ambientais e biofortificação agronômica com Se em cana-de-açúcar.