

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**MODOS DE APLICAÇÃO DE SILÍCIO FLUIDO EM CANA-
PLANTA E CANA-SOCA CULTIVADAS EM LATOSSOLO
VERMELHO EUTROFÉRICO TÍPICO**

José Lucas Farias da Silva

Engenheiro Agrônomo

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**MODOS DE APLICAÇÃO DE SILÍCIO FLUIDO EM CANA-
PLANTA E CANA-SOCA CULTIVADAS EM LATOSSOLO
VERMELHO EUTROFÉRICO TÍPICO**

José Lucas Farias da Silva

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

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

2022

S586m Silva, José Lucas Farias da
Modos de aplicação de silício fluido em cana-planta e
cana-soca cultivadas em latossolo vermelho eutroférico típico /
José Lucas Farias da Silva. -- Jaboticabal, 2022
79 p. : tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Renato de Mello Prado

1. Elemento benéfico. 2. Saccharum officinarum L.. 3.
Fertirrigação. 4. Aplicação foliar. 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.

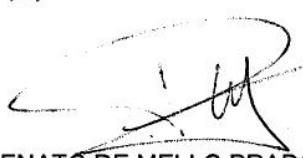
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: MODOS DE APLICAÇÃO DE SILÍCIO FLUIDO EM CANA-PLANTA E CANA-SOCA CULTIVADA EM LATOSSOLO VERMELHO EUTROFÉRICO TÍPICO

AUTOR: JOSÉ LUCAS FARIAS DA SILVA

ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal



Profa. Dra. GILMARA PEREIRA DA SILVA (Participação Virtual)
São Luís/MA / Universidade Estadual do Maranhão - UEMA



Profa. Dra. LUCIANA MARIA SARAN (Participação Virtual)
Departamento de Biotecnologia Agropecuária e Ambiental / FCAV / UNESP – Jaboticabal



Dr. ANTONIO MÁRCIO SOUZA ROCHA (Participação Virtual)
Consultor Autônomo



Dr. DILIER OLIVERA VICIEDO (Participação Virtual)
São Luís/MA / Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Jaboticabal, 13 de julho de 2022

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

JOSÉ LUCAS FARIAS DA SILVA nasceu na cidade de Carpina - PE, em 30 de outubro de 1994, filho de Josenilda Maria Farias da Silva e Ginaldo Farias da Silva, mas cresceu em Lagoa do Itaenga - PE. Possui título de Engenheiro Agrônomo (2018) pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Câmpus Vitória de Santo Antão. Nesta instituição, foi bolsista de Iniciação Acadêmica, de 2014 a 2015, pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), e bolsista de Iniciação Científica, de 2016 a 2018, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), desenvolvendo estudos na área da Física do Solo, Fertilidade do Solo e Produção de Biomassa para Energia, compondo os grupos de pesquisa Produção Vegetal e Manejo do Solo, e Fertilidade do Solo e Agroenergia. Participou de atividades de representação estudantil, sendo vice-presidente do Diretório Acadêmico de Agronomia, gestão 2017-2018, e representante discente no colegiado de Agronomia. Em março de 2019, ingressou no Mestrado, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus Jaboticabal, sendo orientado pelo Prof. Dr. Renato de Mello Prado, onde em julho de 2020 obteve o título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo). Em agosto do mesmo ano, ingressou no Doutorado pelo mesmo programa, desenvolvendo estudos sobre o uso do silício em cana-de-açúcar. Durante o doutorado publicou artigos em revistas de alto fator de impacto, coorientou alunos da graduação e participou de bancas de defesa de conclusão de curso. No mestrado e doutorado atuou como representante discente junto à congregação da FCAV/Unesp e como membro diretor da Associação dos Pós-Graduandos da instituição. Atualmente, compõe o Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da Unesp (Genplant).

“No mundo haveis de ter aflições.

Coragem! Eu venci o mundo.”

João 16,33

À minha avó, Maria José da Silva Pimentel (*in memoriam*), e à minha mãe, Josenilda Maria da Silva (*in memoriam*), mulheres guerreiras, que apesar de todas as dificuldades nunca baixaram a cabeça em nenhum momento da vida.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, Criador dos céus e da Terra, sem o qual nada sou. Por toda força, coragem, ânimo e fé, para conseguir vencer as batalhas diárias e suportar os percalços da vida.

A toda a minha família e amigos, por todo apoio nos mais diversos momentos. Aos meus pais Ginaldo Farias da Silva e Josenilda Maria Farias da Silva (*in memoriam*), por todos os sacrifícios e esforços realizados para a minha criação e educação, e ao meu irmão, Igor Vinícius, pelo companheirismo e irmandade. Aos meus avós Júlio Soares (*in memoriam*), Margarida, José Aurino e Maria José (*in memoriam*).

A Jamilly de Lucena, por todo companheirismo. Meu muito obrigado por estar presente em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renato de Mello Prado, por quem tenho grande admiração e profundo respeito. Agradeço por toda confiança, paciência e pelos ensinamentos repassados de forma didática desde o primeiro dia de conversa. Ao senhor, meu muito obrigado.

A Universidade Estadual Paulista/FCAV, pelo acolhimento e por proporcionar todo conhecimento que me permitiu evolução profissional. Aos amigos e amigas do Genplant, meu muito obrigado por todo companheirismo e conhecimento! Aos servidores do Setor de Solos e Adubos, pela colaboração e amizade.

A Fazenda Palmital, em nome de Regina Sitta e Orlando Ventura, por terem aberto as portas da propriedade para a realização dos experimentos e pelo fruto da amizade. E a todos os funcionários por toda ajuda. Meu muito obrigado!

A Comunidade Católica Chama de Amor, na pessoa do fundador, Raimundo Valdemir, por toda acolhida, orações e escuta.

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

Meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
CAPÍTULO 1 – Considerações gerais	1
1 Introdução	1
2 Revisão de literatura.....	3
2.1 Cultivo da cana-de-açúcar	3
2.2 Silício no solo e na planta	5
2.3 Silício e a cana-de-açúcar	8
3 Referências	10
CAPÍTULO 2 - Fornecimento de silício integrando aplicação do elemento via fertilirrigação no crescimento de MPB e no desenvolvimento da cultura da cana- de-açúcar no campo	17
RESUMO.....	17
ABSTRACT	18
1 Introdução	19
2 Material e métodos	21
2.1 Local de estudo.....	21
2.2 Experimento I	21
2.2.1 Material vegetal.....	21
2.2.2 Tratamentos e delineamento experimental.....	21
2.2.3 Parâmetros avaliados.....	22
2.2.4 Análise estatística	Erro! Indicador não definido.
2.3 Experimento II	23
2.3.1 Material Vegetal e condições de crescimento	24

2.3.2 Tratamentos e delineamento experimental.....	25
2.3.4 Parâmetros biométricos avaliados.....	26
2.4 Análise estatística	27
3 Resultados	27
3.1 Experimento I.....	27
3.2 Experimento II.....	31
4 Discussão.....	33
5 Conclusão	38
6 Referências	38
CAPÍTULO 3 - Silício aplicado via fertirrigação se destaca da via foliar para aumentar produtividade e a qualidade do caldo de duas soqueiras de cana-de- açúcar cultivada em campo	46
RESUMO.....	46
ABSTRACT	47
1 Introdução	48
2 Material e métodos	50
2.1 Local de estudo e condições de crescimento	50
2.2 Tratamentos e delineamento experimental	51
2.3 Parâmetros avaliados	52
3 Resultados	54
4 Discussão.....	60
5 Conclusão	63
6 Referências	63

MODOS DE APLICAÇÃO DE SILÍCIO FLUIDO EM CANA-PLANTA E CANA-SOCA CULTIVADAS EM LATOSSOLO VERMELHO EUTROFÉRICO TÍPICO

RESUMO – A cultura da cana-de-açúcar é fonte de energia renovável e de açúcar, com isso, estudos continuam sendo realizados com a finalidade de se obter maior produtividade e longevidade dos canaviais, havendo menor quantidade de reformas das áreas. A produtividade da cultura é afetada pelas condições ambientais adversas, como o estresse hídrico, sendo necessária a busca por estratégias que atenuem os efeitos na cultura. O uso do silício (Si) pode favorecer as culturas por ser um elemento benéfico, porém, a fonte utilizada do elemento no cultivo da cana-de-açúcar é sólida, o que aumenta o custo do manejo. Assim, são necessários estudos com o uso de fonte solúvel de Si na cana-de-açúcar. Este estudo teve por objetivo avaliar os efeitos do fornecimento de Si no desenvolvimento de mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar, bem como os efeitos das diferentes formas de aplicação do elemento em cana-planta e em canaviais com tempo de cultivo mais avançado. Foram realizados quatro experimentos em campo. Inicialmente foi desenvolvido estudo realizando fertirrigação com Si na fase de rustificação de MPB. Posteriormente foi conduzido estudo que avaliou os efeitos do Si fornecido de diferentes formas (fase de formação de MPB; via foliar; via fertirrigação; e fornecimento na fase de muda combinada com fertirrigação em campo) em área de cana-planta. Outros dois estudos foram realizados em soqueiras de cana-de-açúcar, em área de diferentes idades, sendo avaliados os efeitos do Si fornecido via foliar ou via fertirrigação. O Si fornecido na fase de MPB aumentou o conteúdo do elemento nas mudas e proporcionou maior desenvolvimento. A aplicação do Si nas MPB combinada com a fertirrigação em campo proporcionou melhoria nos aspectos fisiológicos e aumento na produtividade em cana-planta. Em áreas de soqueira, a fertirrigação com Si proporcionou maior desenvolvimento da cultura. Em todos os experimentos, o fornecimento do Si ao proporcionar aumento do conteúdo do elemento na cana-de-açúcar, favoreceu o metabolismo da cultura, favorecendo os aspectos fisiológicos, como a produção de pigmentos fotossintéticos, aumento no teor de compostos fenólicos, menor índice de extravasamento de eletrólitos celulares e incremento das variáveis biométricas e de produtividade. Assim, o estudo propõe um sistema inédito que muda o conceito de fertilização de Si na cana-de-açúcar a partir de um programa integrado, que pode ser iniciado na fase de formação de mudas, ou na fase de campo em área de cana-planta ou de soqueiras, que deverá ter impacto direto na produtividade e na sustentabilidade do cultivo.

Palavras-chave: elemento benéfico, *Saccharum officinarum* L., fertirrigação, aplicação foliar

APPLICATION METHODS OF FLUID SILICON IN CANE-PLANT AND CANE-CROP CULTIVATED IN EUTRUTOX OXISOL

ABSTRACT – The sugarcane crop is important because it is a source of renewable energy, there is a demand for an increase in world production, and despite advances in crop management, studies continue to be carried out in order to obtain greater productivity, and thus, greater longevity of the cane fields, which allows for a smaller amount of cane field reforms. As crop productivity can be directly affected by environmental conditions, it is necessary to search for strategies that can attenuate the adverse effects on the crop, thus contributing to the yield of cane-plant and ratoon areas. The use of Si, which is a beneficial element, can favor the growth of crops with or without stress, however, in the cultivation of sugarcane, the source used of the element is solid, which ends up increasing the cost of management. Thus, studies with the use of soluble source of Si in sugarcane are necessary. Therefore, this study aimed to verify the immediate effects of Si supply on the development of sugarcane MPB, as well as in areas with more advanced cultivation ages. Four experiments were carried out at field level. Initially, a study was carried out and fertigation with Si was carried out in the hardening phase of sugarcane MPB. Subsequently, a study was carried out to evaluate the effects of Si supplied in different ways (MPB formation phase; via foliar; fertigation; and seedling formation and fertigation in the field) in a cane-plant area. Two other studies were carried out in sugarcane ratoons, in areas of different ages, and the effects of Si supplied via foliar or via fertigation were evaluated. The supply of Si in the MPB formation phase was efficient to increase the element content in the seedlings and provide greater development. The supply of Si in the seedling formation phase combined with fertigation in the field provided a better response in the sugarcane plants. In ratoon areas, fertigation provided greater crop development. In all experiments, the supply of Si, by providing an increase in the content of the element in the sugarcane, favored the physiological metabolism of the culture, causing a beneficial effect by favoring the production of photosynthetic pigments, greater production of phenolic compounds, lower index of extravasation of cellular electrolytes, and increase in biometric and productivity variables. Thus, the study proposes an unprecedented system that changes the concept of Si fertilization in sugarcane from an integrated program, which can be initiated in the seedling formation phase, or in the field phase in a sugarcane area. plant or ratoons, which should have a direct impact on the productivity and sustainability of the crop.

Keywords: beneficial element, *Saccharum officinarum* L., fertigation, foliar application

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1 Introdução

A produção mundial da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) tem apresentado grande expansão, devido a importância energética que a cultura apresenta (Ferraz Junior et al., 2022; Silva et al., 2020), sendo então necessárias novas estratégias de manejo para alcançar altas produtividades.

Os cortes consecutivos dos canaviais proporcionam decréscimo na produção da cana-de-açúcar ao longo do tempo (Silva et al., 2020). Apesar dos avanços no manejo da cultura, estudos continuam sendo realizados com a finalidade de se obter maior produtividade, e assim, maior longevidade dos canaviais. Quando não se atende a produção mínima necessária para o produtor, é preciso reformar os canaviais.

A implantação de novas áreas tem sido realizada com o uso de colmos-semente ou de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (MPB), onde ambas apresentam vantagens e desvantagens quanto ao uso e manejo no campo (Landell et al., 2012; Xavier et al., 2013), porém, há o predomínio do uso dos colmos-sementes.

Independente da forma que foi implantada (uso de MPB ou de colmos-sementes), a produtividade da cana-de-açúcar pode ser afetada diretamente por condições ambientais (Camargo et al., 2017) que podem prejudicar o desenvolvimento da cultura recém-implantada, ou de áreas já existentes, no caso das soqueiras de cana-de-açúcar. Assim, é necessária a busca por estratégias que possam atenuar os efeitos adversos à cultura, aumentando o rendimento das áreas de cana-planta e das soqueiras.

O uso do silício (Si), que é um elemento benéfico, pode favorecer o crescimento das culturas submetidas ou não a estresses (Cooke; Leishman, 2016; Prado, 2021), devido os diferentes benefícios do elemento, como nos aspectos fisiológicos por aumentar os pigmentos fotossintetizantes, fortalecer o sistema de defesa antioxidativo e favorecer a eficiência fotossintética, relatados em diferentes espécies (Barros et al., 2019; Oliveira et al., 2021, 2019b; Rocha et al., 2022). Na cana-de-açúcar, os

benefícios do Si são contundentes devido à cultura ser considerada acumuladora do elemento (Oliveira Filho et al., 2021; Santos et al., 2020; Savant et al., 1999). Contudo, esses estudos são restritos a condições ambientais controladas.

Os estudos avaliando o Si na cultura da cana-de-açúcar em campo predominam com uso de silicatos sólidos, a exemplo do silicato de cálcio (Camargo; Korndörfer; Wyler, 2014; Camargo; Rocha; Baltieri, 2021), que ao ter solubilidade muito baixa em água, emprega-se doses elevadas do elemento no solo. Estudos recentes, tem indicado o uso de fontes solúveis a base de silicato de potássio ou silicato de sódio, que permitem diminuir as doses do elemento e manter os benefícios biológicos nas plantas (Prado, 2021).

Assim, as fontes solúveis de Si podem favorecer o crescimento inicial de MPB cultivadas em condição controlada ou em vaso, quando o Si é fornecido via pulverizações foliares (Santos et al., 2020; Teixeira; Prado; Rocha, 2021), mas tem havido destaque para o fornecimento do Si via fertirrigação (Teixeira et al., 2020a, 2021). No entanto, faltam informações se esses efeitos benéficos do Si solúvel no crescimento inicial da cana-de-açúcar se prolongam o suficiente para aumentar o crescimento dos colmos e a produtividade, e se há efeitos de fontes solúveis em soqueiras da cultura, especialmente em cultivos de campo.

Desse modo, se faz necessária a realização de estudos que possam proporcionar maior rendimento da cultura da cana-de-açúcar, e portanto, surgem as hipóteses de que (i) a fertirrigação com Si na produção das MPB possui efeitos imediatos no seu crescimento e residual ao incrementar a produtividade da cultura subsequente; (ii) o uso de MPB enriquecida com Si associado com a fertirrigação com Si no campo se destaca no aumento da produtividade da cana-de-açúcar; (iii) o Si fornecido via fonte solúvel em soqueiras de cana-de-açúcar de diferentes idades pode beneficiar a cultura em campo na produtividade e na qualidade do colmo; (iv) os mecanismos benéficos do Si em cana-planta ou em soqueiras, como o aumento dos pigmentos fotossintetizantes e do sistema de defesa antioxidante, e consequentemente, na produtividade, ocorrem de modo proporcional ao aumento do conteúdo de Si na planta, promovido pelos diferentes modos de aplicação deste elemento.

Estas hipóteses, se confirmadas, permitirão o uso de um programa de fertilização silicatada, que integra a fase de produção das MPB e seu desenvolvimento no campo, bem como a fertilização com o Si em áreas de soqueiras de cana-de-açúcar, podendo abrir novos caminhos com a ampliação do uso do elemento na cultura, contribuindo para o cultivo sustentável, beneficiando diferentes regiões do mundo que cultiva essa espécie.

Neste cenário, foram realizados estudos objetivando-se verificar os efeitos imediatos do fornecimento de Si no desenvolvimento de MPB de cana-de-açúcar, bem como em áreas com idades de cultivo mais avançadas.

2 Revisão de literatura

2.1 Cultivo da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é oriunda da região leste da Indonésia e Nova Guiné, sendo disseminada e cultivada na China, antes do início da era cristã, e na Europa, pelos árabes. Foi introduzida no Brasil no início do século XVI, na Ilha da Madeira, por Martin Afonso de Souza na primeira expedição colonizadora ao país, constituindo-se uma das primeiras atividades de importância econômica da então colônia, onde foi disseminada principalmente para os estados do Nordeste (Daniels; Roach, 1987).

O Brasil possui a maior produção de cana-de-açúcar do mundo (FAO, 2022), apresentando produtividade média de 70,4 t ha⁻¹ e produção total de 643 milhões de toneladas na safra 2021/2022 (CONAB, 2022). As condições climáticas do país, que são favoráveis à cultura, aliadas as grandes áreas cultiváveis, tornam promissor o cultivo dos canaviais, apresentando importância para o agronegócio brasileiro. Além disso, a cultura é considerada uma grande alternativa para o setor de biocombustíveis, onde, além da produção de açúcar, as unidades produtoras buscam maior eficiência operacional devido o uso da biomassa para produção de energia elétrica, proporcionando sustentabilidade na industrialização (CONAB, 2022).

Assim, devido a importância da cultura para a economia nacional, anualmente, os centros de pesquisa em melhoramento vegetal espalhados pelo país vêm

selecionando híbridos que apresentem elevadas produtividades, havendo necessidade de maior conhecimento da nutrição desses genótipos para poder também aumentar a longevidade dos canaviais.

A região Centro-Sul do Brasil concentra a maior área e maior produção de cultivo da cana-de-açúcar do país, sendo responsável na safra 2021/22 por 530 milhões de toneladas, em 7,7 milhões de hectare, seguida pelas regiões Norte e Nordeste (CONAB, 2022). O estado de São Paulo é o maior produtor nacional, apresentando produtividade de 71,6 t ha⁻¹ em 4,1 milhões de hectares (CONAB, 2020).

O cultivo da cana-de-açúcar é destinado em maior parte à produção do açúcar. No entanto, nos últimos anos tem sido observada mudança neste cenário, com aumento na produção de etanol, indicando tendência do mercado em fortalecer o setor energético (CONAB, 2022). Além disso, o mercado sulcro-energético destina parte da produção da cana-de-açúcar para a geração de energia, sendo uma fonte de energia limpa (Cursi et al., 2021).

O cultivo da cana-de-açúcar permite a realização de uma colheita anual, podendo apresentar longevidade que varia de 5 a 11 anos, mas, quando a rebrota da cultura apresenta baixa porcentagem, é importante a reforma dos canaviais para que se aumente a média de produtividade da cultura (Silva et al., 2020).

Atualmente, as reformas dos canaviais têm sido realizadas em maior parte com o uso de colmos-sementes, no entanto, tem tido grande avanço o uso de mudas pré-brotadas (MPB). A técnica da MPB é um método alternativo, que apresenta a vantagem de redução de até 90% do volume de colmos-sementes por hectare para reforma da área, além de plantas saudáveis e com maior uniformidade (Xavier et al., 2013). No entanto, as MPB apresentam maior demanda hídrica e nutricional, pois possuem menor reserva, em relação aos colmos (Landell et al., 2012).

O uso de colmos para formação de novas áreas é o método consolidado no setor canavieiro. Porém, não apresentam qualidade genética e sanitária controlada, além de possuir maior potencial de ocorrência de falhas nas áreas. Em adição, pode ser necessário maior consumo de material quando se utilizam de colmo sementes,

por danos que as gemas podem sofrer devido o intenso uso de máquinas para o transporte dos colmos (Landell et al., 2012; Robothan; Chapell, 2002).

Em áreas já implantadas, a ocorrência de estresses ambientais, e os cortes consecutivos dos canaviais, resultam em menor brotação das soqueiras, menor perfilhamento das plantas, e menor desenvolvimento que consequentemente resultará em menor produção das áreas, sendo cíclica a ocorrência da reforma dos canaviais (Xu et al., 2021).

Contudo, estudos continuam sendo realizados com o intuito de melhorar a performance das técnicas utilizadas no momento do plantio da cultura ou no manejo após a rebrota, bem como no manejo realizado após o corte da cana-de-açúcar, a exemplo da fertilização silicatada.

2.2 Silício no solo e na planta

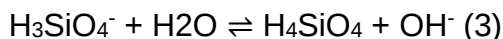
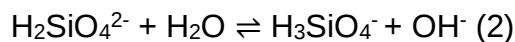
O Si é considerado um elemento onipresente na natureza (Epstein, 2009), porém, a exploração dos solos ao longo do tempo pelos cultivos proporcionou a remoção contínua do elemento, sendo que solos bastantes intemperizados apresentam baixos teores do Si (Foy 1992; Juo; Sanchez 1986).

No solo, o Si pode ser encontrado na solução, adsorvido a superfícies, e na estrutura de minerais (Korndörfer et al., 2002). O equilíbrio dinâmico do Si no solo é dependente do pH (Epstein, 1999), pois em ambiente com $\text{pH} < 9,0$, há maior presença de espécies monoméricas do elemento. No entanto, se houver alta concentração destas espécies pode ocorrer a polimerização, processo pelo qual unidades monoméricas de ácido silícico formam uma cadeia, resultando na formação de sílica polimérica ou sílica de massa molecular elevada, deixando o elemento indisponível para as plantas (Williams; Crerar, 1985).

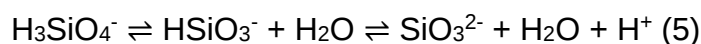
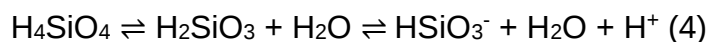
A química do Si em solução é relativamente complexa havendo relatos das reações com silicato de sódio que é semelhante ao silicato de potássio. A dissociação do silicato de sódio ocorre em cinco etapas e foi sugerida por Greenburg e Sinclair (1955):



Devido às baixas constantes de ionização do ácido silícico, a maior parte dos íons $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$, sofre hidrólise em duas etapas:



Em seguida tem-se a dissociação de H_3SiO_4^- e H_4SiO_4 segundo as equações:



Entre pH 6 e 11, as soluções de metassilicato de sódio contém mais HSiO_3^- e H_2SiO_3 do que SiO_3^{2-} . A proporção de moléculas de H_2SiO_3 não depende do pH. A proporção de íons HSiO_3^- é maior em soluções de pH mais elevado.

Observa-se que o H_4SiO_4 predomina em meio ácido e o equilíbrio com H_3SiO_4^- ocorre em pH = 9,6 (pKa1). A presença de $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ torna-se significativa a partir de pH = 11,0 e o equilíbrio com H_3SiO_4^- ocorre em pH próximo à 14 (pKa2). Um dos parâmetros importante que controla a cinética da polimerização de sílica é o pH. A taxa mínima de polimerização é obtida em pH = 2,0. Essa taxa aumenta em duas vezes sua magnitude em $3 < \text{pH} < 5$ e, mais duas vezes, em $6 < \text{pH} < 9$. Além disso, em concentrações elevadas de Si em solução tem-se polimerização total formando um gel em poucos minutos, mas se essa concentração diminuir em cinco vezes essa mesma polimerização total pode ocorrer, mas após muitas horas.

Observa-se claramente que valor do pH e a concentração de Si em solução são fatores importantes para a polimerização. No entanto, em soluções de Si diluídas ($M < 3 \text{ mmol L}^{-1}$) com $\text{pH} \geq 7$ tem-se a polimerização, mas sua velocidade é relativamente baixa e portanto, existem em solução espécies monoméricas (moleculares ou iônicas) que são passíveis de serem absorvidas pelas plantas. Assim, é importante o preparo da solução com Si e o seu uso imediato no campo, visando evitar que a polimerização ocorra em extensão que possa prejudicar a absorção, via foliar ou radicular, do elemento pela planta.

O ácido monossilícico (H_4SiO_4) é a forma em que o elemento Si é absorvido pelas plantas, podendo ser o resultado final do intemperismo químico de minerais silicatados (Basile-Doelsch et al., 2005), porém, ocorre lentamente (Cornelis et al., 2011). A absorção do ácido monossilícico pelas raízes das plantas pode ocorrer de forma ativa, através de transportadores específicos existentes na membrana plasmática das células das raízes, ou por processo passivo, através da corrente de transpiração (Ma; Yamaji, 2006).

O transporte do Si nas plantas ocorre através do fluxo de transpiração, em consonância com o Lsi6 (transportador de influxo), que conduzem o elemento através do xilema, facilitando o transporte para as diferentes partes das plantas (Mandlik et al., 2020). Quanto a redistribuição, o Si ao ser absorvido é transportado para os locais de maior taxa transpiratório, sendo a maior parte complexada nas paredes celulares por formar opala (fitólitos), com isso, o elemento apresenta baixa redistribuição nas plantas (Fox et al., 1969).

Diversas são as fontes de Si disponíveis no mercado, as quais apresentam diferentes solubilidades. O silicato de cálcio tem baixa solubilidade, no entanto, apresentam vantagens como o aumento do pH do solo, a precipitação do Al^{3+} e aumento das concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} (Epstein, 1999; Savant et al., 1999).

A aplicação de silicato sólido no solo, como os resíduos siderúrgicos que contêm silicato de cálcio, pouco solúvel, deve ser realizada em área total para favorecer sua dissolução. Assim, há aumento dos custos da aplicação, além deste tipo de resíduo apresentar metais pesados e elementos potencialmente tóxicos, que restringem o desenvolvimento vegetal (Accioly et al., 2000).

Os silicatos fluídos como silicato de potássio apresentam as vantagens de possuir maior teor de Si solúvel, pronta disponibilidade no mercado e fácil aplicação no campo. Uma outra fonte de Si solúvel é o silicato de sódio que é pouco utilizado na agricultura, embora tenha custo inferior ao silicato de potássio, mas por conter sódio na sua composição pode causar salinidade dependendo da espécie e da quantidade aplicada (Lima Filho; Lima; Tsai, 1999). Em adição, é possível aumentar a estabilidade das fontes solúveis do elemento, com o uso do sorbitol. O sorbitol é um poliol que

permite que a forma monomérica do Si (H_4SiO_4) seja mantida, permitindo maior absorção do elemento pelas culturas (Kubicki e Heaney, 2003).

Assim, os silicatos solúveis permitem a aplicação em fases específicas da cultura, podendo ser via fertirrigação ou via pulverizações foliares (Marafon; Endres, 2013).

Nas plantas, o Si apresenta atuação física, bioquímica e fisiológica. Na atuação física, a absorção do Si proporciona dupla deposição de sílica na epiderme foliar, proporcionando maior resistência a danos mecânicos, permitindo que as plantas apresentem melhor arquitetura foliar, reduzindo o autossombreamento (Ma; Yamaji, 2015). Quanto a atuação bioquímica e fisiológica, o Si aumenta a eficiência fotossintética das folhas, a produção de pigmentos fotossintéticos e a fluorescência da clorofila, além de aumentar a tolerância das plantas a seca, por ajustar as taxas de transpiração (Ferraz et al., 2015; Maghsoudi et al., 2015).

Em adição, a fertilização com Si proporciona maior rendimento das culturas, devido a maior absorção de nutrientes (Eneji et al., 2008), diminuição dos sintomas de toxicidade a metais pesados (Sarwar et al., 2010) e de danos resultantes de déficit hídrico (Camargo et al., 2017).

Dessa forma, acredita-se que por apresentar diversos benefícios para as plantas, a fertilização com Si é viável no cultivo da cana-de-açúcar, sendo necessária a realização de estudos para elucidar qual a forma de fornecimento do elemento benéfico pode apresentar maior eficiência e maior conteúdo na planta.

2.3 Silício e a cana-de-açúcar

Em canaviais, sejam áreas oriundas de plantios com o uso de MPB ou de colmos-sementes, diferentes fatores afetam o desenvolvimento da cultura, podendo resultar em até 70% de redução de rendimento da produção (Veatch-Blohm, 2007).

As áreas cultivadas com cana-de-açúcar têm sido implantadas em meses que apresentam altas temperaturas, que se correlacionam com o déficit hídrico, afetando o desenvolvimento da cultura, principalmente na fase de perfilhamento, sendo essa

considerada o período mais crítico (Dinh et al. 2017). Logo, verifica-se que durante seu ciclo, a cultura está submetida a condições de estresses. Por isso, faz-se necessário o uso de estratégias para otimizar o cultivo de cana-de-açúcar.

O Si, apesar de não ser nutriente é considerado elemento benéfico, e pode ser o elemento mais absorvido pela cana-de-açúcar (Tisdale et al., 1985). No entanto, solos muito intemperizados apresentam teores baixos do elemento disponível às plantas. Este problema, pode ser potencializado em áreas exploradas ao longo dos anos pela cana-de-açúcar, devido à cultura ser grande acumuladora de Si (Foy 1992; Juo; Sanchez 1986).

A disponibilidade do Si beneficia a cana-de-açúcar, devido a sensibilidade da cultura a estresses ambientais (Lakshmanan; Robinson, 2014), podendo então o Si atenuar os efeitos de longos períodos de estresse, devido sua atuação por exemplo, na manutenção do potencial hídrico foliar (Amin et al., 2014). Em adição, o Si apresenta efeito mais evidente quando se trata da mitigação de estresses abióticos, a exemplo do nutricional e do hídrico (Neu et al. 2017; Camargo et al. 2017), que proporcionam diminuição na produtividade (Basnayake et al. 2012) e na qualidade tecnológica (Shukla et al., 2019).

Na literatura, há relatos de estudos baseados no fornecimento de Si em cana-de-açúcar (Camargo et al., 2014; Camargo et al., 2017), porém são trabalhos nos quais foram utilizadas fontes sólidas de silicato, incorporadas no solo, o que requer maior demanda operacional e pode não ter viabilidade econômica. No entanto, com o uso de fontes solúveis, é possível diminuir as perdas do elemento em consequência do uso de doses menores, além da possibilidade de aplicações pontuais, como a aplicação foliar e a fertirrigação.

Logo, se faz necessário a realização de estudos com a finalidade de verificar os efeitos de diferentes modos de aplicação do Si em cana-plantas e em soqueiras, e seus efeitos imediatos.

Quanto a fertirrigação, o Brasil possui 11,2 milhões de hectares de cana-de-açúcar irrigada, sendo que 79,5% das áreas são fertirrigadas. Quanto ao Estado de São Paulo, 2 milhões de hectares são fertirrigados, representando 33,6% da área

canavieira (Ana, 2019). No entanto, estudos que realizaram aplicação do Si via foliar ou via fertirrigação com a cultura da cana-de-açúcar são incipientes, limitando-se à resposta da cultura na fase de formação de muda e de primeira soqueira (Oliveira Filho et al., 2021). É possível em áreas de cana-de-açúcar não irrigadas utilizar estratégias para viabilizar o uso de fontes fluídas de Si.

Na fertilização com Si na fase inicial de MPB, Teixeira et al. (2020), avaliaram o efeito do Si aplicado via fertirrigação e via foliar em MPB, nas concentrações 2 e 3,4 mmol L⁻¹, respectivamente, em condição de déficit hídrico. Os autores evidenciaram que a fertilização com Si via raiz proporcionou maior teor de clorofila, maior crescimento e produção de biomassa em relação a pulverização foliar do elemento.

Ao realizar uma vasta revisão de literatura sobre os efeitos do Si na cana-de-açúcar, Majumdar e Prakash (2020), evidenciaram a falta de estudos sobre os efeitos da aplicação do elemento na cultura, via fertirrigação e recomendaram a realização de ensaios experimentais.

Logo, há relatos das contribuições do elemento para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, no entanto, estudos sobre a fertilização com Si fornecido de diferentes formas, em diferentes épocas, e seus efeitos em cana-planta, soqueiras de diferentes anos e seu efeito residual, são escassos. Assim, as respostas das diferentes formas de fertilização com Si e seus efeitos na longevidade dos canaviais podem fornecer um melhor entendimento da atuação do elemento na cultura da cana-de-açúcar, além de gerar informações ao produtor sobre sua viabilidade e a melhor forma de fornecimento do elemento visando incremento da produção.

A sustentabilidade agrícola está ganhando relevância nos últimos anos e o silício pode favorecer o cultivo sustentável da cana-de-açúcar na medida que se usa fontes solúveis em doses relativamente baixas associado a métodos eficientes de aplicação e que possam melhorar a produtividade e a qualidade do caldo, mas isso precisa ser comprovado.

3 Referências

Accioly AMA, Furtini Neto AE, Muniz JÁ, Faquin V, Guedes GAA (2000) Pó de forno elétrico de siderurgia como fonte de micronutrientes e contaminantes para plantas

- de milho. In **Pesquisa Agropecuária Brasileira** (35th ed., pp. 1483–1491).
- Acquaah G (2012) *Principles of Plant Genetics and Breeding*. Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781118313718>
- ANA (2019) *Levantamento da cana-de-açúcar irrigada e fertirrigada no Brasil* (2ª edição).
- Barros TC, Prado RM, Roque CG, Arf MV, Vilela RG (2019) Silicon and salicylic acid in the physiology and yield of cotton. **Journal of Plant Nutrition**, 42(5), 458–465.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1567765>
- Basile-Doelsch I, Meunier JD, Parron C (2005) Another continental pool in the terrestrial silicon cycle. **Nature**, 433(7024), 399–402.
<https://doi.org/10.1038/nature03217>
- Basnayake J, Jackson PA, Inman-Bamber NG, Lakshmanan P (2012) Sugarcane for water-limited environments. Genetic variation in cane yield and sugar content in response to water stress. **Journal of Experimental Botany**, 63(16), 6023–6033.
<https://doi.org/10.1093/jxb/ers251>
- Camargo MS, Bezerra BKL, Vitti AC, Silva MA, Oliveira AL (2017) Silicon fertilization reduces the deleterious effects of water deficit in sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 17(1), 99–111. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000008>
- Camargo MS, Korndörfer GH, Wyler P (2014) Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. **Field Crops Research**, 167, 64–75.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.07.009>
- Camargo MS, Rocha G, Baltieri GJ (2021) Silicate fertilization in sugarcane: silicon availability, uptake, and recovery index over two consecutive cycles. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 21(3), 2403–2411.
<https://doi.org/10.1007/s42729-021-00531-y>
- CONAB (2022) *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: safra 2021/22*.

- Cooke J, Leishman MR (2016) Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. **Functional Ecology**, 30(8), 1340–1357. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12713>
- Cornelis JT, Delvaux B, Georg RB, Lucas Y, Ranger J, Opfergelt S (2011) Tracing the origin of dissolved silicon transferred from various soil-plant systems towards rivers: a review. **Biogeosciences**, 8(1), 89–112. <https://doi.org/10.5194/bg-8-89-2011>
- Cursi DE, Hoffmann HP, Barbosa GVS, Bressiani JÁ, Gazaffi R, Chapola RG, Fernandes Junior AR, Balsalobre TWA, Diniz CA, Santos JM, Carneiro MS (2022) History and current status of sugarcane breeding, germplasm development and molecular genetics in Brazil. **Sugar Tech**, 24(1), 112–133. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-00951-1>
- Daniels J, Roach BT (1987) Taxonomy and Evolution. In ***Sugarcane Improvement through Breeding*** (pp. 7–84).
- Dinh TH, Watanabe K, Takaragawa H, Nakabaru M, Kawamitsu Y (2017) Photosynthetic response and nitrogen use efficiency of sugarcane under drought stress conditions with different nitrogen application levels. **Plant Production Science**, 20(4), 412–422. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2017.1371570>
- Eneji AE, Inanaga S, Muranaka S, Li J, Hattori T, An P, Tsuji W (2008) Growth and nutrient use in four grasses under drought stress as mediated by silicon fertilizers. **Journal of Plant Nutrition**, 31(2), 355–365. <https://doi.org/10.1080/01904160801894913>
- Epstein E (1999) Silicon. **Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.**, 50, 641–664.
- Epstein E (2009) Silicon: its manifold roles in plants. **Annals of Applied Biology**, 155(2), 155–160. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x>
- FAO (2022) The agricultural production indices. In ***Food and Agricultural Organisation of the United Nations***.
- Ferraz Junior ADN, Etchebehere C, Perecin D, Teixeira S, Woods J (2022) Advancing anaerobic digestion of sugarcane vinasse: Current development, struggles and

- future trends on production and end-uses of biogas in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 157(December 2021). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112045>
- Ferraz RLS, Magalhães ID, Beltrão NEM, Melo AS, Brito Neto JF, Rocha MS (2015) Photosynthetic pigments, cell extrusion and relative leaf water content of the castor bean under silicon and salinity. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 19(9), 841–848. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n9p841-848>
- Fox RL, Silva JÁ, Plucknett DL, Teranishi DY (1969) Soluble and total silicon in sugar cane. **Plant and Soil**, 30(1), 81–92. <https://doi.org/10.1007/BF01885263>
- Foy CD (1992) *Soil Chemical Factors Limiting Plant Root Growth* (pp. 97–149). https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2894-3_5
- Greenberg AS, Sinclair D (1955) The polymerization of silicic acid. **The Journal of Physical Chemistry**, 59(5), 435–440. <https://doi.org/10.1021/j150527a014>
- Lakshmanan P, Robinson N (2013) Stress physiology: abiotic stresses. In ***Sugarcane: physiology, biochemistry, and functional biology*** (pp. 411–434).
- Landell MGA, Campana MP, Figueiredo P, Xavier MA, Anjos IA, Dinardo-Miranda LL, Scarpari MS, Garcia JC, Bidóia MAP, Silva DN, Mendonça JR, Kanthack RAD, Campos MF, Brancalhão SR, Petri RH, Miguel PEM (2012) Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas. **Instituto Agrônomo de Campinas, Documentos**, 17.
- Lima Filho OF, Lima MTG, Tsai SM (1999) O silício na agricultura. In ***Informações Agrônomicas*** (87th ed., p. 7).
- Ma JF, Yamaji N (2015) A cooperative system of silicon transport in plants. **Trends in Plant Science**, 20(7), 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.04.007>
- Mandlik R, Thakral V, Raturi G, Shinde S, Nikolić M, Tripathi DK, Sonah H, Deshmukh R (2020) Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. **Journal of Experimental Botany**, 71(21), 6703–6718.

<https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>

- Marafon AC, Endres L (2013) Silicon: fertilization and nutrition in higher plants. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, 56(4), 380–388. <https://doi.org/10.4322/rca.2013.057>
- Mitani N, Yamaji N, Ma JF (2009) Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology**, 50(1), 5–12. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcn110>
- Neu S, Schaller J, Dudel EG (2017) Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports**, 7(1), 40829. <https://doi.org/10.1038/srep40829>
- Oliveira Filho ASB, Prado RM, Teixeira GCM, Piccolo MC, Rocha AMS (2021) Water deficit modifies C:N:P stoichiometry affecting sugarcane and energy cane yield and its relationships with silicon supply. **Scientific Reports**, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00441-0>
- Oliveira KS, Prado RM, Checchio MV, Gratão PL (2021) Silicon via nutrient solution modulates deficient and sufficient manganese sugar and energy cane antioxidant systems. **Scientific Reports**, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96427-z>
- Oliveira RLL, Prado RM, Felisberto G, Cruz FJR (2019) Different sources of silicon by foliar spraying on the growth and gas exchange in sorghum. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 19(4), 948–953. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00092-1>
- Prado RM (2021) *Mineral nutrition of tropical plants*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4>
- Rocha ILO, Prado RM, Oliveira KS, Silva DL, Abreu-Junior CH (2022) Foliar spraying of Mn with addition of Si increases phenolic compound, photosynthetic efficiency, productivity and the protein content of the soybean crop. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00780-5>
- Santos LCN, Teixeira GCM, Prado RM, Rocha MAS, Pinto RCS (2020) Response of pre-sprouted sugarcane seedlings to foliar spraying of potassium silicate, sodium

- and potassium silicate, nanosilica and monosilicic acid. **Sugar Tech**, 22(5), 773–781. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00833-y>
- Sarwar N, Saifullah Malhi SS, Zia MH, Naeem A, Bibi S, Farid G (2010) Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 90(6), 925–937. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3916>
- Savant NK, Korndörfer GH, Datnoff LE, Snyder GH (1999) Silicon nutrition and sugarcane production: A review. **Journal of Plant Nutrition**, 22(12), 1853–1903. <https://doi.org/10.1080/01904169909365761>
- Shukla SK, Solomon S, Sharma L, Jaiswal VP, Pathak AD, Singh P (2019) Green Technologies for Improving Cane Sugar Productivity and Sustaining Soil Fertility in Sugarcane-Based Cropping System. **Sugar Tech**, 21(2), 186–196. <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00706-z>
- Silva EF, Moitinho MR, Teixeira DDB, Bicalho ES, Castioni GAF, Pereira GT, La Scala N (2020) Short-term spatiotemporal variation of soil CO₂ emission, temperature, moisture and aeration in sugarcane field reform areas under the influence of precipitation events. **Soil Use and Management**, 36(4), 658–670. <https://doi.org/10.1111/sum.12633>
- Teixeira GCM, Prado RM, Rocha AMS (2021) Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water deficit damage in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, February, 1–10. <https://doi.org/10.1111/jac.12511>
- Teixeira GCM, Prado RM, Rocha MAS, Santos LCN, Sarah MMS, Gratório PL, Fernandes C (2020) Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the effects of water deficit after transplanting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 20(3), 849–859. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00170-4>
- Teixeira GCM, Prado RM, Rocha MAS, Sousa Junior GS, Gratório PL (2021) Beneficial effect of silicon applied through fertigation attenuates damage caused by water deficit in sugarcane. **Journal of Plant Growth Regulation**, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10510-3>

Tisdale SL, Nelson WL (1985) *Soil fertility and fertilizers* (4th ed.).

Williams LA, Parks GA, Crerar DA (1985) Silica diagenesis: I. Solubility controls. **Journal of Sedimentary Petrology**, 55(3), 301–311.
<https://doi.org/10.1306/212f86ac-2b24-11d7-8648000102c1865d>

Xavier MA, Landell MGA, Campana MP, Figueiredo P, Mendonça JR, Dinardo-Miranda LL, Scarpari MS, Garcia JC, Anjos IA, Azania CAM, Brancalhão SR, Kanthack RAD, Aferri G, Silva DN, Bidóia MAP, Campos MF, Perruco D, Matsuo RS, Neves JCT, Lorenzato CM (2014) Fatores de desuniformidade e kit de pré-brotação IAC para sistema de multiplicação de cana-de-açúcar – Mudas Pré-Brotadas (MPB). **Documentos IAC 113**, 28.

Xu F, Wang Z, Lu G, Zeng R, Que Y (2021) Sugarcane ratooning ability: research status, shortcomings, and prospects. **Biology**, 10(10), 1052.
<https://doi.org/10.3390/biology10101052>

CAPÍTULO 2 - Fornecimento de silício via fertirrigação no crescimento de MPB e no desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar no campo

RESUMO

A adoção de modo estratégico de fornecimento de silício (Si) pode ampliar a resposta da cana-de-açúcar a este elemento. Assim, realizou-se este estudo com o objetivo de avaliar se o fornecimento de Si na fase de formação de muda pré-brotada (MPB) teria efeito após o transplântio em campo semelhante ao fornecimento de Si apenas na fase de campo (via foliar ou via fertirrigação); e se o fornecimento de Si na fase de formação de MPB associado a fertirrigação do Si após o transplântio é capaz de potencializar ou ampliar o benefício do Si. Realizaram-se dois experimentos. No experimento I, as MPB foram cultivadas em viveiro sem Si (Controle) e fertirrigação com Si ($1,8 \text{ mmol L}^{-1}$), havendo 15 repetições, em delineamento inteiramente casualizado. O experimento II foi realizado no campo, em Latossolo Vermelho eutroférico típico, com seguintes tratamentos: sem fornecimento de Si (Controle); Si fornecido na fase de formação de MPB (vide Experimento I); Si via foliar (3 mmol L^{-1}) em campo; Si fornecido via fertirrigação ($1,8 \text{ mmol L}^{-1}$) em campo; e Si fornecido na fase de formação da MPB e no desenvolvimento em campo, com 5 repetições, em blocos casualizados. O uso do Si nas duas fases da cultura beneficiou a cana-de-açúcar a partir do aumento do conteúdo de pigmentos fotossintetizantes e do sistema de defesa antioxidativo. A inovação do manejo do Si a ser fornecido via fertirrigação integrado nas duas fases da cultura (MPB e em campo) otimiza o uso do elemento por aumentar a produtividade e sustentabilidade do cultivo.

Palavras-chave: elemento benéfico, *Saccharum officinarum* L., fertirrigação, aplicação foliar

Supply of silicon integrating the application of the element via fertigation in the growth of MPB and in the development of the sugarcane crop in the field

ABSTRACT

The adoption of a strategic way of supplying silicon (Si) can increase the response of sugarcane to this element. Thus, this study was carried out with the aim of evaluating whether the supply of Si in the pre-sprouted seedling formation phase (MPB) would have an effect after transplanting in the field similar to the supply of Si only in the field phase (via foliar or via fertirrigation); and whether the supply of Si in the MPB formation phase associated with Si fertirrigation after transplanting is capable of enhancing or expanding the benefit of Si. Two experiments were carried out. In experiment I, MPB were cultivated in a nursery without Si (Control) and fertigation with Si (1.8 mmol L^{-1}), with 15 replications, in a completely causalized design. Experiment II was carried out in the field, in a typical eutroferric Red Latosol, with the following treatments: without Si supply (Control); Si provided in the MPB formation phase (see Experiment I); Si foliar route (3 mmol L^{-1}) in the field; Si provided via fertigation (1.8 mmol L^{-1}) in the field; and Si supplied in the MPB formation phase and in the field development, with 5 repetitions, in randomized blocks. The use of Si in the two phases of the crop benefited sugarcane by increasing the content of photosynthetic pigments and the antioxidative defense system. The innovation of Si management to be supplied via fertirrigation integrated in the two phases of the crop (MPB and in the field) optimizes the use of the element by increasing the productivity and sustainability of the crop.

Keywords: beneficial element, *Saccharum officinarum* L., fertigation, foliar application

1 Introdução

A cultura da cana-de-açúcar possui importância por ser fonte de energia renovável, havendo demanda para que se tenha aumento da produção mundial (Abdali et al., 2022; Alokika et al., 2021; Ferraz Junior et al., 2022; Silva et al., 2020). Isso ocorre devido à necessidade crescente de substituição da energia não renovável provinda do petróleo por bioenergia fazendo parte de um conjunto de estratégias internacionais para mitigação dos gases do efeito estufa, que afetam as mudanças climáticas.

Na etapa do plantio da cana-de-açúcar no campo tem se expandido o uso de mudas pré-brotadas (MPB), que é uma alternativa em relação ao método convencional que emprega o uso de colmos (Landell et al., 2012; Xavier et al., 2014). No entanto, por utilizar de mini colmo, as MPB tem pouca reserva de água e de nutrientes (Landell et al., 2012), características que tornam o material muito sensível após o transplante devido os diversos estresses que podem ocorrer no campo.

O uso do silício (Si) pode favorecer o desenvolvimento das plantas. Este elemento pode favorecer o crescimento das culturas, com ou sem estresse (Cooke & Leishman, 2016; Prado, 2021) devido aos benefícios fisiológicos que proporciona, incrementando a biossíntese de pigmentos fotossintetizantes, fortalecendo o sistema de defesa antioxidante e a eficiência fotossintética, fato observado na cana-de-açúcar (Teixeira, Prado, Rocha, & Piccolo, 2020; Teixeira, Prado, Rocha, et al., 2021). Em adição, na cana-de-açúcar os benefícios do Si são favorecidos devido à cultura apresentar alta eficiência de absorção radicular do elemento (Oliveira Filho et al., 2021; Santos et al., 2020; Savant et al., 1999).

Estudos recentes, tem indicado o uso de fontes solúveis, a base de silicato de potássio ou silicato de sódio, que permitem diminuir as doses do Si e manter os benefícios biológicos nas plantas (Prado, 2021). Por apresentar alto teor de Si solúvel, estas fontes podem favorecer o crescimento inicial das MPB cultivadas em vaso, quando fornecido via pulverizações foliares (Santos et al., 2020; Teixeira, Prado, &

Rocha, 2021), ou, com maior destaque, via fertirrigação (Teixeira, Prado, Rocha, et al., 2021; Teixeira, Prado, Rocha, Santos, et al., 2020), mas essas mudas não foram transplantadas para o campo. É possível que o uso de MPB enriquecidas com Si ao serem transplantada para o campo, possam apresentar melhor desenvolvimento, mas, isso pode ser potencializado se houver complemento do elemento no campo, seja via foliar ou via fertirrigação. Em adição, existem indícios que o fornecimento de Si, mesmo na ausência de estresses, favorece a taxa fotossintética e o crescimento inicial da cultura (Yan et al., 2018), e conseqüentemente, a produção de biomassa. No entanto, faltam informações para verificar se esses efeitos do Si no crescimento inicial da cana-de-açúcar cultivada em vasos, observado em trabalhos anteriores, se prolongam o suficiente para aumentar o crescimento dos colmos e a produtividade em condições de campo.

Neste contexto, um desafio importante seria avançar nas pesquisas para definir o melhor manejo e o modo de fornecimento do Si, empregando fontes solúveis, para potencializar a sua absorção e os aspectos fisiológicos, a fim de integrar as fases de produção de MPB e de campo.

Nesse sentido, surgem as seguintes hipóteses: (i) a fertirrigação com Si na produção das MPB possui efeitos imediatos no seu crescimento e residual ao incrementar a produtividade da cultura após transplântio para campo; (ii) o uso de MPB fertilizadas com Si tem efeito residual na produtividade da cultura após o transplântio semelhante a pulverização foliar realizada em campo; (iii) o uso de MPB fertilizadas com Si associado com a fertirrigação com o elemento após o transplântio se destaca no aumento da produtividade da cultura; (iv) é possível que os mecanismos benéficos do Si se devam as melhorias fisiológicas na cana-de-açúcar que refletem na produtividade da cultura, ocorrendo de forma proporcional ao aumento do conteúdo de Si na planta promovido pelos diferentes modos de aplicação deste elemento.

Neste cenário, realizou-se este estudo objetivando-se verificar se o fornecimento de Si na fase de formação da MPB teria efeito após o transplântio em campo semelhante ao fornecimento de Si apenas na fase de campo (via foliar ou via fertirrigação); e se o fornecimento de Si na fase de formação de MPB associado a

fertirrigação do Si após o transplântio é capaz de potencializar ou ampliar o benefício do Si.

2 Material e métodos

2.1 Local de estudo

Foram realizados dois experimentos na Fazenda Palmital, em Jaboticabal, estado de São Paulo, Brasil (21°10'24.762"S 48°17'19.838"W). O clima da região é classificado como tropical úmido (Aw), com verão úmido e inverno seco, segundo Köppen.

2.2 Experimento I

2.2.1 Material vegetal

O estudo foi realizado em viveiro com o uso de MPB de cana-de-açúcar, cultivar CTC 9001, adquiridas de viveiro comercial após a fase de aclimação. As MPB adquiridas possuíam quatro folhas emergidas do broto. Durante o desenvolvimento das MPB, entre os meses de agosto e setembro de 2020, a temperatura média mínima foi 16,2°C e a máxima 31,7°C, sendo medida com o uso de termo-higrômetro.

2.2.2 Tratamentos e delineamento experimental

As MPB foram submetidas aos seguintes tratamentos: Controle (sem fornecimento de Si) e Si via fertirrigação, havendo 15 repetições, dispostos em delineamento inteiramente casualizados. A unidade experimental foi constituída por bandeja de plástico, tendo célula (140 cm³) preenchida com vermiculita contendo uma MPB.

A fertirrigação com Si teve início no processo de rustificação, sendo utilizada a concentração de 2 mmol L⁻¹ de Si na forma de silicato de sódio (188,6 g L⁻¹ de Si e 50,1 g L⁻¹ de Na), sendo realizado aos 2, 6, 10, 14, 18, 22, 26 e 30 dias após o início da fase de rustificação, totalizando 8 aplicações do elemento. A água utilizada foi de

nascente própria da fazenda, e o valor pH não foi ajustado. A fertirrigação foi realizada a 5 cm acima das MPB.

A definição da concentração do Si para a fertirrigação seguiu a indicação de valor utilizada em diversos estudos, com diferentes culturas (Barreto et al., 2017). As MPB também receberam a cada 10 dias o fornecimento de nitrogênio (N), fósforo (P) e cálcio (Ca), nas quantidades de 0,05; 0,12 e 0,04 g por MPB, respectivamente, via solução aplicando 15 mL por célula. As fontes utilizadas foram fosfato monoamônico e o nitrato de cálcio.

Para a irrigação das MPB foi considerada a evapotranspiração de referência, sendo repostado 80% do valor do dia anterior, sendo parcelada em duas aplicações ao dia. A água utilizada foi adquirida de nascente da própria fazenda. Os dados utilizados como base para realização da irrigação foram adquiridos da Estação Agroclimatológica da Fcav/Unesp.

Aos 30 dias após início da aplicação dos tratamentos, foram realizadas as avaliações na folha +1 (primeira folha de cima para baixo, com bainha totalmente visível) das MPB, as quais estão descritas a seguir.

2.2.3 Parâmetros avaliados

2.2.3.1 Pigmentos fotossintéticos

A determinação do teor de clorofila total e do de carotenoides foi realizada de acordo com o método proposto por Lichtenthaler (1987), sendo coletados no terço médio do limbo foliar dois discos de 6 mg. As leituras foram realizadas em um espectrofotômetro a 663 nm (clorofila a) e 470 nm (carotenoides); e o conteúdo, definido com base na matéria fresca.

2.2.3.2 Rendimento quântico do fotossistema II (Fv/Fm)

O rendimento quântico do FSII foi mensurado com o uso do fluorômetro (Opti-Sciences® - Os30p+). As medições se deram entre 6h e 6h30 da manhã. Para que ocorresse a adaptação da folha à luz, pinças foram colocadas no terço médio da folha +1 de cada planta durante 30, sendo submetidas ao escuro antes da excitação do pulso de luz vermelha de 1 segundo. Assim, foi determinado: F0 (fluorescência inicial),

Fm (fluorescência máxima), Fv (variação na fluorescência calculada a partir de F0 e Fm), e assim, a obtenção da Fv/Fm (rendimento quântico do FSII) (razão de fluorescência variável e fluorescência máxima).

2.2.3.3 Teor de compostos fenólicos

O teor foliar dos compostos fenólicos totais foi determinado através de reação colorimétrica e leitura em espectrofotômetro, de acordo com Singleton e Rossi (1965), sendo determinado em gramas equivalentes de ácido gálico (EAG) por grama de extrato.

2.2.3.4 Índice de extravasamento de eletrólitos celulares

Foram realizadas coletas de cinco discos foliares com diâmetro de 5mm, do terço médio de folhas +1. Os discos foram emergidos em 20 mL de água deionizada durante 2h. Em seguida foi realizada a leitura da condutividade elétrica inicial (C1). As amostras foram colocadas em autoclave a 121°C por 20 min, e após o resfriamento foi realizada a leitura da condutividade elétrica final (C2). As leituras foram realizadas com um medidor de condutividade elétrica (AK51, Akso, Brazil). O índice de extravasamento de eletrólitos celulares foi determinado através seguinte fórmula: $C1/C2 \times 100$ (Dionisio-Sese & Tobita, 1998).

2.2.3.5 Massa seca da parte aérea

Foram coletadas cinco MPB por parcela para a obtenção da massa seca. As MPB foram lavadas com água deionizada, solução detergente (Extran® a 0,1% (v/v)), solução ácida (HCl 0,3% (v/v)) e água deionizada. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65±5°C até atingir massa constante. Posteriormente as amostras foram pesadas para a determinação da massa seca da parte aérea e moídas em moinho tipo Wiley.

2.2.3.6 Teor de Si

O teor de Si foi determinado na parte aérea das MPB a partir da digestão alcalina com NaOH e oxidação de carbono com H₂O₂ (Kraska e Breitenbeck, 2010), seguida por leitura em espectrofotômetro colorimétrico (Korndörfer et al., 2004).

2.3 Experimento II

2.3.1 Material Vegetal e condições de crescimento

O estudo foi realizado em campo, com a variedade de cana-de-açúcar CTC 9001, durante os meses de setembro de 2020 a março de 2021. Os dados de temperaturas (°C) do ar e pluviosidade (mm) durante o período experimental foram adquiridos da Estação Agroclimatológica da Fcav/Unesp (Figura 1).

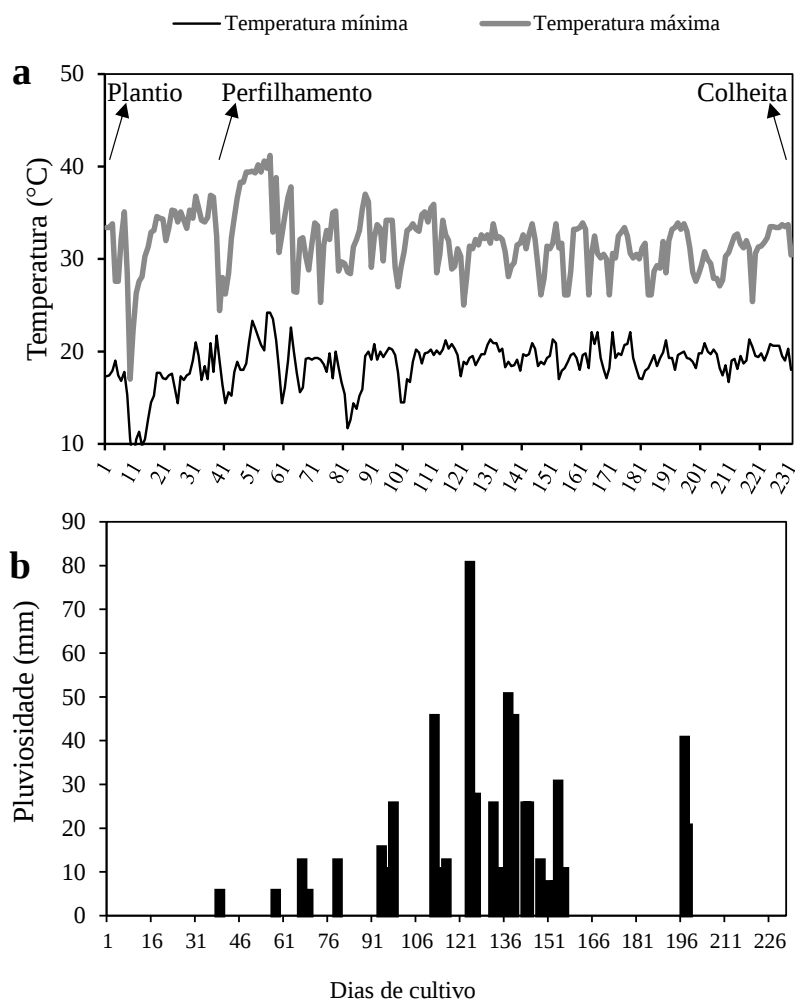


Figura 1. Temperatura máxima e mínima do ar (a) e pluviosidade (b) durante o desenvolvimento do experimento II.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho eutroférico típico. Realizou-se coleta das amostras de solo da camada de 0-0,2m para realização da análise química para fins de fertilidade (Raij et al., 2001) tendo os seguintes resultados: pH (CaCl₂): 5,2; P (resina): 29,0 mg dm⁻³; matéria orgânica: 23 g dm⁻³; K: 1,0 mmol_c dm⁻³; Ca: 40 mmol_c dm⁻³; Mg: 13,0 mmol_c dm⁻³; H+Al: 39,0 mmol_c

dm^{-3} ; Al: $0,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. O teor de Si disponível (extrator em CaCl_2) no solo (10 mg dm^{-3}) foi determinado de acordo com o método colorimétrico (Kondörfer et al., 2004), sendo considerado teor baixo (Camargo & Keeping, 2021).

Com base na análise química do solo, realizou-se cálculo da necessidade de calcário com o objetivo para elevar a saturação por base (V) à 70%. O calcário utilizado foi o dolomítico, e foi aplicado na superfície do solo e incorporado na camada de 0-20cm de profundidade.

Na área, foram realizadas operações de subsolagem e gradagem em área total. Realizou-se a abertura de sulcos de plantio com 0,35 m de profundidade e em seguida foram aplicados compostos orgânicos (4 t de cama de frango ha^{-1} e 10 t de torta de filtro ha^{-1}) e fertilizantes minerais contendo 7 kg N ha^{-1} , 34 kg P_2O_5 ha^{-1} e 11 kg K_2O ha^{-1} , empregando-se sulfato de amônio, superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente, como fontes de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K).

Foi utilizado o herbicida metolacoloro (2 L ha^{-1}), classificado como pré-emergente, aplicado 15 dias antes da realização do plantio da cana-de-açúcar (MPB), para controle de plantas daninhas. Durante o cultivo das linhas-mães, foram aplicados 40 kg N ha^{-1} e 15 kg K_2O ha^{-1} , 70 dias após o plantio.

As MPB foram plantadas com espaçamento de 0,6 m entre plantas. Após a realização do plantio, as plantas foram irrigadas com 30 mm diários, durante seis dias consecutivos, com a finalidade de garantir adequado pegamento das mudas no campo.

2.3.2 Tratamentos e delineamento experimental

A variedade foi submetida aos seguintes tratamentos: sem fornecimento de Si (Controle); fornecimento do Si no período de rustificação das mudas (Si Muda); aplicação de Si foliar (Si Foliar), fornecimento de Si via fertirrigação após o plantio (Si Fert); e combinação dos tratamentos Si Muda com Si Fert (Si Muda+Fert), com cinco repetições, dispostas em blocos casualizados. As parcelas foram compostas pela linha-mãe, havendo 7,2 m de comprimento.

O fornecimento de Si nas MPB do tratamento SiMuda teve início no processo de rustificação, conforme relatado no Experimento I. A fertirrigação com Si nos tratamentos no campo Si Fert e Si Muda+Fert ($1,8 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si) foram realizadas em 15 aplicações. No período inicial de 6 dias após o transplântio da MPB para campo foi realizada irrigação (lâmina 30mm) diária e em seguida foi aplicado o Si. Posteriormente, foram realizadas nove aplicações do elemento aos 99, 113, 125, 127, 133, 138, 140, 145 e 155 dias após o transplântio das MPB logo após precipitação pluvial ($>20\text{mm}$). Em todas as 15 fertirrigações, as aplicações foram realizadas direcionada na linha de plantio, com solução contendo Si na quantidade equivalente a uma lâmina hídrica de 1,5 mm.

A aplicação do tratamento Si Foliar teve início na fase de formação do colmo, quando a planta apresentava área foliar considerável, com 4 meses após o plantio. Foram realizadas três aplicações, em intervalo de 15 dias. As aplicações do Si Foliar (3 mmol L^{-1}) foram realizadas com uso do pulverizador uniport (Jactor 2030), sendo regulado o valor pH da calda igual a $5,5 \pm 0,1$ com o uso do adjuvante agrícola Startec ($1 \text{ mL}/100 \text{ L}$ água), e com vazão ajustada para 200 L ha^{-1} de calda. As aplicações foram realizadas ao final do dia, com umidade relativa do ar apresentando valor $\geq 60\%$, medido com o uso de termo-higrômetro. A determinação da concentração do Si no tratamento Si Foliar seguiu recomendação da literatura (Teixeira, Prado, Rocha, Santos, et al., 2020). Em ambos os tratamentos a fonte de Si utilizada foi o silicato de sódio estabilizado com sorbitol ($169,7 \text{ g L}^{-1}$ de Si e $50,1 \text{ g L}^{-1}$ de Na).

Aos 179 dias após o plantio, foram coletadas 10 folhas +1 por parcela. A coleta foi realizada às 6h da manhã, e as folhas foram acondicionadas em caixa de isopor com gelo com o intuito de preservar o material, e logo após, foi transportado para o Laboratório de Nutrição de Plantas da Fcav/Unesp para a realização das análises fisiológicas, conforme descrito no Experimento I.

Aos 180 dias após o plantio, o experimento foi finalizado, sendo realizada as avaliações biométricas nas plantas presentes nos 5,2 m lineares da parte central da parcela, sendo todas as variáveis analisadas descritas a seguir.

2.3.4 Parâmetros biométricos avaliados

2.3.4.1 Altura, número de perfilhos, taxa de desdobra e produtividade

Aos seis meses após o plantio, foi obtido a altura dos colmos através de medição com o uso de fita métrica, medida na base do colmo até a inserção da folha +1. Também foi contado o número de perfilhos nos 5,2 metros lineares da parte central da parcela, sendo calculado para ser expresso em número de perfilhos em 1m.

A taxa de desdobra foi calculada a partir da soma métrica das alturas dos colmos presentes em 1m linear da linha de plantio da cana-de-açúcar, que expressa o nível de multiplicação de cada metro linear de cana-de-açúcar para ser utilizado como colmo-semente. Todos os colmos presentes nos 5,2 metros lineares da parte central da parcela foram coletados e pesados, sendo assim estimada a produtividade por hectare.

2.3.4.2 Teor de Si em plantas de cana-de-açúcar

Para a determinação do teor de Si na parte área da cana-de-açúcar, foi seguida a metodologia utilizada no Experimento I. Foi realizada a coleta de 10 plantas por parcela. As plantas foram trituradas, e logo após, foi coletada amostras que foram acondicionadas em sacos de papel e foram levadas para secagem em estufa a $65\pm5^{\circ}\text{C}$. Ao atingirem massa constante, as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley.

2.4 Análise estatística

Os dados de ambos os experimentos foram verificados quanto à normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e homogeneidade das variâncias (teste de Levene), e foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($p\leq 0,05$) e os valores médios dos tratamentos comparados pelo teste de LSD ($p=0,05$). O coeficiente de correlação de Pearson foi determinado para medir a correlação entre as variáveis do estudo ($p\leq 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas por meio do software estatístico SAS® (Cary, NC, USA).

3 Resultados

3.1 Experimento I

O fornecimento do Si via fertirrigação proporcionou maior teor do elemento nas MPB ($13,0 \text{ g kg}^{-1}$) quando comparadas as MPB do tratamento controle ($9,5 \text{ g kg}^{-1}$), havendo aumento de 36% no teor do elemento (Figura 2a). Em adição, a fertirrigação com Si incrementou o teor de clorofila total (Figura 2b), de carotenoides (Figura 2c), da eficiência quântica do fotossistema II (F_v/F_m) (Figura 2d) e dos fenóis totais (Figura 2e); e diminuiu o extravasamento de eletrólitos celulares (Figura 2f) em relação ao não fornecimento do elemento (Controle).

Como resultado, a aplicação de Si incrementou a produção de massa seca da parte aérea das MPB em 36% em relação ao não fornecimento do elemento (Figura 1g), sendo este incremento fortemente correlacionado com o teor do Si na parte aérea ($r = 0,72^{**}$) (Tabela 1).

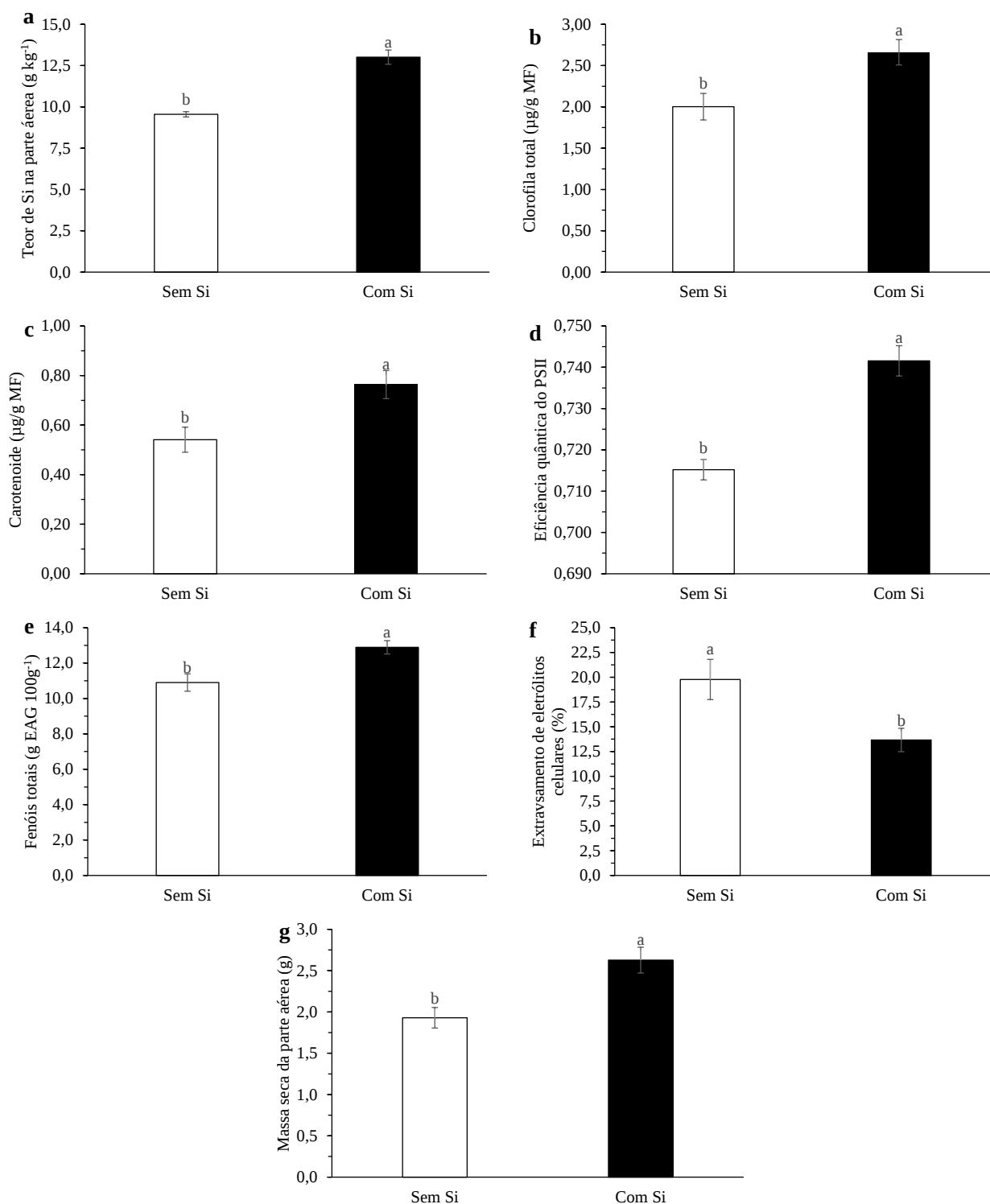


Figura 2. Teor de Si na parte aérea (a), teor de clorofila total (b), teor de carotenóides (c), eficiência quântica do FSII (d), teor de fenóis totais (e), extravasamento de eletrólitos celulares (f) e produção de matéria seca da parte aérea (g) em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar cultivadas sem e com o fornecimento do Si via fertirrigação. As barras de erro representam o erro padrão das médias. As letras diferem entre os tratamentos, de acordo com o teste LSD a 5% de probabilidade.

Tabela 1. Correlação de Pearson ($p \leq 0,05$) entre as várias analisadas para os experimentos I (fase de MPB) e II (fase de campo). ^{ns}: $p > 0,05$. EEC¹: Extravasamento de eletrólitos celulares.

	Teor de Si	Clorofila total	Carotenoides	Fv/Fm	Fenóis totais	EEC ¹	Altura	Perfilhamento	Taxa de desdobra
Experimento I									
Clorofila total	0,41 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-
Carotenoides	0,48*	0,86**	-	-	-	-	-	-	-
Fv/Fm	0,60**	0,38 ^{ns}	0,37 ^{ns}	-	-	-	-	-	-
Fenóis totais	0,60**	0,18 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,23 ^{ns}	-	-	-	-	-
EEC	-0,31 ^{ns}	0,18 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	-0,40 ^{ns}	-0,32 ^{ns}	-	-	-	-
Massa seca	0,72**	0,43 ^{ns}	0,60**	0,49*	0,56*	-0,23 ^{ns}	-	-	-
Experimento II									
Clorofila total	0,90**	-	-	-	-	-	-	-	-
Carotenoides	0,87**	0,95**	-	-	-	-	-	-	-
Fenóis totais	0,82*	0,87**	0,87**	-	-	-	-	-	-
EEC ¹	-0,10 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	-	-0,17 ^{ns}	-	-	-	-
Altura	0,95**	0,87**	0,86**	-	0,87**	-0,11 ^{ns}	-	-	-
Perfilhamento	0,94**	0,90**	0,83**	-	0,84**	-0,03 ^{ns}	0,92**	-	-
Taxa de desdobra	0,94**	0,89**	0,84**	-	0,86**	-0,07 ^{ns}	0,95**	0,96**	-
Produtividade	0,94**	0,87**	0,82**	-	0,88**	-0,07 ^{ns}	0,93**	0,94**	0,93**

3.2 Experimento II

O fornecimento do Si apenas na fase de rustificação das MPB (Si Muda) ou via pulverização foliar (Si Foliar) foi eficiente em aumentar o teor de Si na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar (9,08 e 9,32 g kg⁻¹, respectivamente), quando comparado com o tratamento controle (6,67 g kg⁻¹) (Figura 3a). No entanto, a fertirrigação com Si apenas na fase de campo (Si Fert), proporcionou maior teor (11,0 g kg⁻¹) do elemento na parte aérea das plantas, comparado à Si Muda e Si Foliar. A fertirrigação com Si na fase de produção das MPB combinada com a fertirrigação em campo no desenvolvimento das plantas (Si Muda+Fert), proporcionou maior teor de Si (13,3 g kg⁻¹) na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar em comparação aos demais tratamentos (Figura 3a).

As plantas de cana-de-açúcar do tratamento Si Muda e do tratamento Si Foliar apresentaram maior teor de clorofila total (0,626 e 0,684 µg g⁻¹ MF, respectivamente) e maior teor de carotenoides (0,169 e 0,164 µg g⁻¹ MF, respectivamente), em comparação as plantas do tratamento controle (0,490 e 0,130 µg g⁻¹ MF, respectivamente). O tratamento Si Fert e o tratamento Si Muda+Fert proporcionaram ainda maior incremento no teor de clorofila total (0,808 e 0,862 µg g⁻¹ MF, respectivamente) (Figura 3b) e de carotenoides (0,209 e 0,233 µg g⁻¹ MF, respectivamente) (Figura 3c), nas plantas de cana-de-açúcar, em comparação aos demais tratamentos.

O tratamento Si Muda+Fert, em relação aos demais tratamentos, promoveu maior produção de fenóis totais (22,3 g EAG 100g⁻¹) (Figura 3d) e menor extravasamento de eletrólitos celulares (23%) (Figura 2e). Observa-se também que os tratamentos Si Foliar e Si Fert, em relação aos tratamentos Si Muda e Controle, apresentaram maior produção de fenóis totais (16,76 e 18,41 g EAG 100g⁻¹, respectivamente) (Figura 3d) e menor índice de extravasamento de eletrólitos celulares (28 e 26%, respectivamente) (Figura 3e).

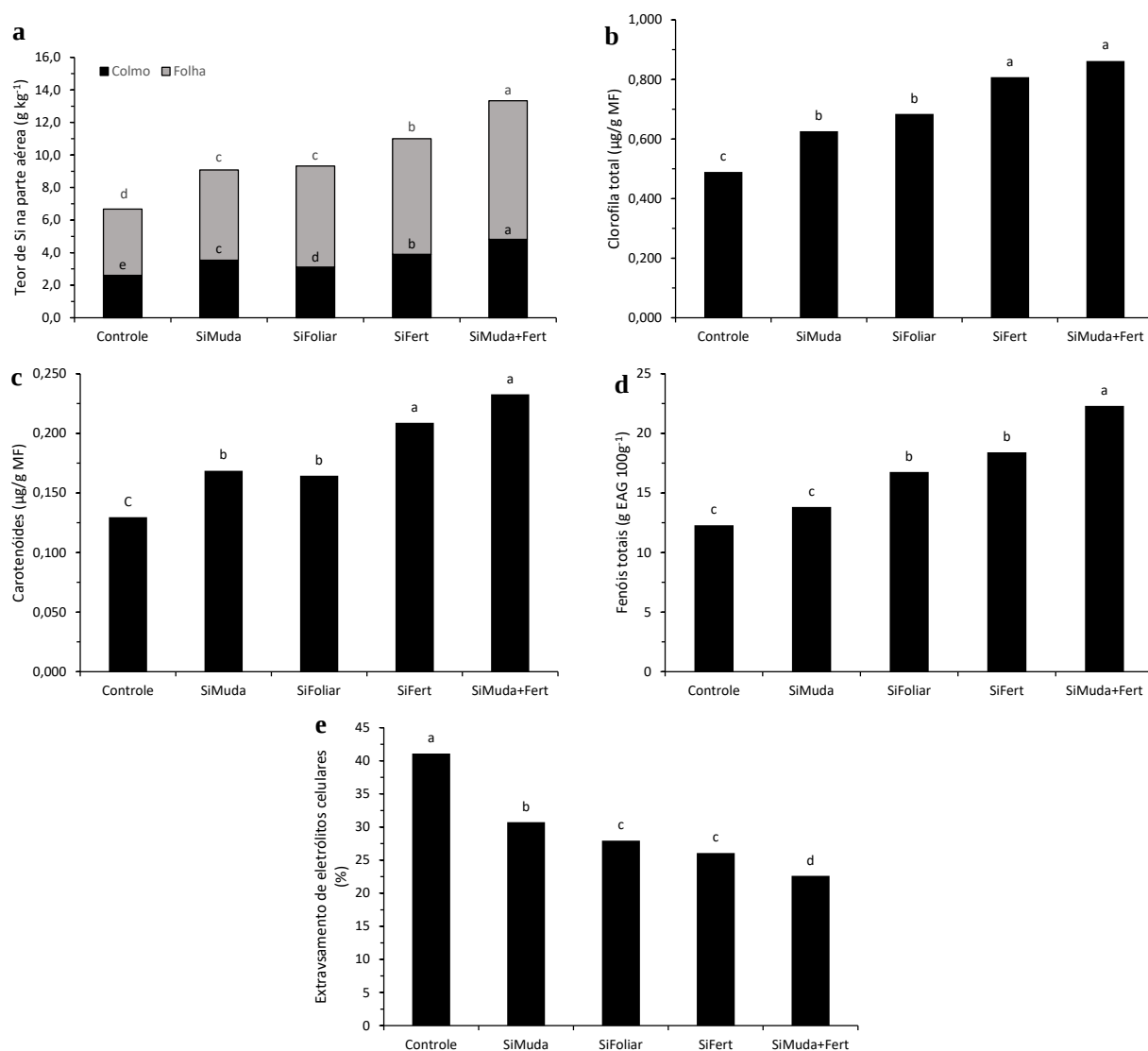


Figura 3. Teor de Si na parte aérea das plantas (a), teor de clorofila total (b), teor de carotenóides (c), teor de fenóis totais (d) e índice de extravasamento de eletrólitos celulares (e) em cana-de-açúcar cultivada sem e com o fornecimento do Si durante diferentes fases de desenvolvimento: sem fornecimento do Si (controle); fornecimento do Si na fase de formação das MPB (SiMuda); fornecimento do Si via pulverização foliar (SiFoliar); fornecimento via fertirrigação no campo (SiFert); e fornecimento do Si na fase de formação de MPB e no desenvolvimento da cultura (SiMuda+Fert). As letras minúsculas diferem entre os tratamentos, de acordo com o teste LSD a 5% de probabilidade.

Os tratamentos Si Muda e Si Foliar apresentaram semelhanças na avaliação biométrica, que refletiram na produtividade da cultura, que atingiu 91 e 92 t ha⁻¹, respectivamente (Figura 4), no entanto, o tratamento Si Fert destacou-se destes tratamentos para estas variáveis. Em adição, o tratamento Si Muda+Fert destacou-se dos demais tratamentos, por apresentar maiores valores de altura do colmo (1,48 m)

(Figura 4a), maior número de perfilhos (18,8 por metro linear) (Figura 4b), maior taxa de desdobra dos colmos (1m:28m) (Figura 4c) e maior produtividade (101 t ha⁻¹) (Figura 4d). Observa-se que houve forte correlação entre o teor do Si na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar com as variáveis biométricas, com destaque para a altura do colmo ($r = 0,94^{**}$) e a produtividade ($r = 0,93^{**}$) (Tabela 1).

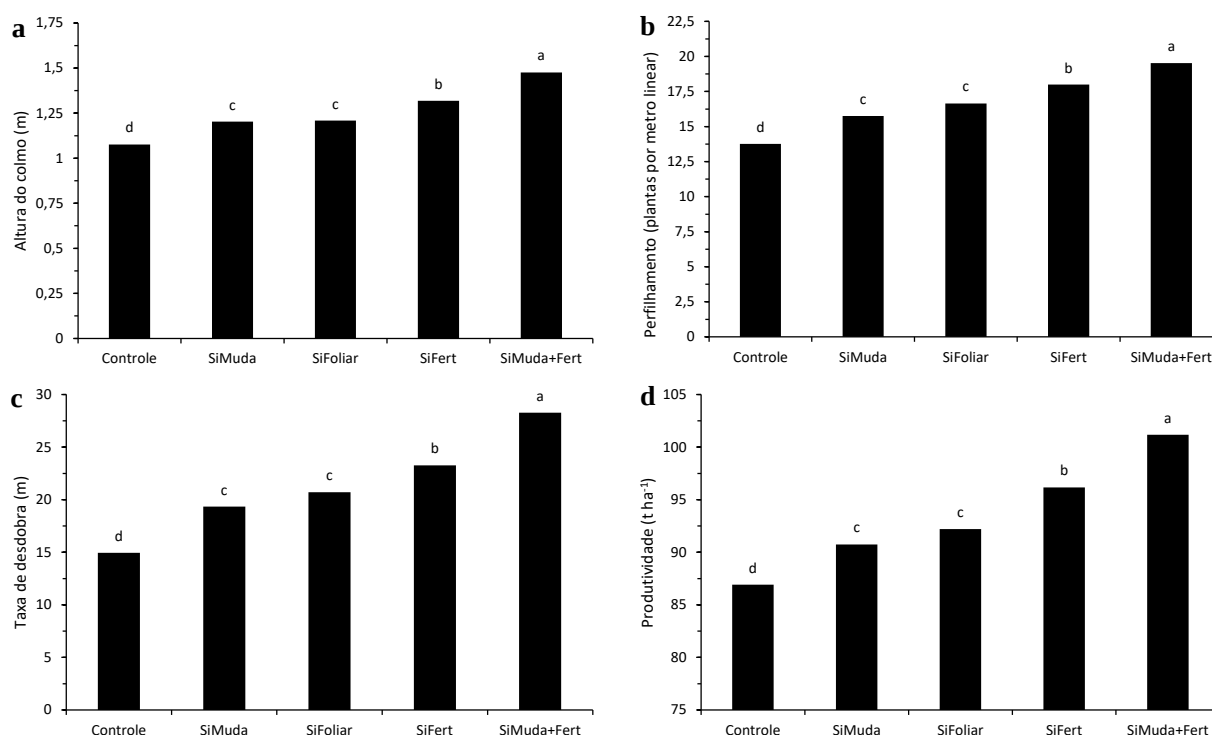


Figura 3. Altura do colmo (a), número de perfilhos (b), taxa de desdobra (c) e produtividade (d) da cana-de-açúcar cultivada sem e com o fornecimento do Si durante diferentes fases de desenvolvimento: sem fornecimento do Si (Controle); fornecimento do Si na fase de formação das MPB (SiMuda); fornecimento do Si via pulverização foliar (SiFoliar); fornecimento via fertirrigação no campo (SiFert); e fornecimento do Si na fase de formação de MPB e no desenvolvimento da cultura (SiMuda+Fert). As letras minúsculas diferem entre os tratamentos, de acordo com o teste LSD a 5% de probabilidade.

4 Discussão

O uso de fontes solúveis de Si na cultura da cana-de-açúcar é recente, iniciando os estudos em MPB, tendo resultados promissores na cultura devido aos incrementos na absorção do Si quando aplicado via foliar ou em fertirrigação, verificados em plantas estressadas (Teixeira, Prado, & Rocha, 2021; Teixeira, Prado,

Rocha, & Piccolo, 2020; Teixeira, Prado, Rocha, Santos, et al., 2020). No entanto, também observamos resultados semelhantes em nossos estudos com Si solúvel com MPB, mas cultivada sem estresse (Figura 2a) havendo relatos que plantas sem estresse tem maior absorção de Si comparadas as plantas estressadas (Teixeira, Prado, Rocha, et al., 2021), podendo favorecer ganhos biológicos para as plantas.

Além disso, havia dúvidas sobre a viabilidade da aplicação de Si solúvel via solução (fertirrigação ou foliar) em cana-de-açúcar cultivada em campo, em aumentar a absorção de Si na cultura. Isso ocorre porque os estudos nessa condição foram realizados com fontes de Si (silicato de cálcio) com solubilidade em água muito baixa, além do uso de doses relativamente altas, que foram incorporadas no solo em área total (até 600 kg ha⁻¹ de Si) (Camargo et al., 2017), ou em sulcos de plantio (55 até 165 kg ha⁻¹ de Si) (Camargo et al., 2014, 2021).

O nosso estudo pela primeira vez evidenciou que a aplicação de Si solúvel em doses relativamente baixas, por via foliar em três pulverizações (50,4 g ha⁻¹ de Si) ou por fertirrigação em quinze aplicações (2,3 kg ha⁻¹ de Si), na cana-de-açúcar em condição de campo, foi efetiva para aumentar o teor do elemento na cultura (Figura 3a), podendo ter favorecido a absorção pela planta. Acredita-se que o aumento do conteúdo de Si na planta, a partir de soluções deste elemento aplicadas via foliar ou via fertirrigação, se deve a forma de Si solúvel diluído (≤ 3 mmol de Si), pois evita-se processos de polimerização que poderia diminuir a absorção do elemento pela planta (Oliveira, Prado, Felisberto, Checchio, et al., 2019). Na solução do solo, o Si está em forma iônica (SiO_3^{2-} e SiO_4^{4-}) (Kozlov et al., 2021), que não é polimerizada em concentrações diluídas. Esses resultados do potencial uso do Si em solução na cana-de-açúcar têm implicação prática importante para mudar a filosofia do modo de aplicação de Si no campo, podendo ter impacto direto na relação custo/benefício da fertilização silicatada na cultura devido ao fato de emprego de doses de Si relativamente baixas.

Uma outra constatação inédita foi o fato que o uso de MPB que receberam Si durante sua formação em viveiro resultou em MPB enriquecida de Si (Figura 2a), sendo importante para aumentar o teor de Si na cultura em campo após o transplântio (Figura 3a), em relação as plantas do tratamento Controle, indicando claramente que

houve efeito acumulativo do Si. Assim, fica confirmado que o Si presente nas MPB pode ser transferido para a cultura da cana-de-açúcar no campo, fato importante pois justifica o uso de MPB enriquecidas com Si. Isso pode indicar que parte do Si nas MPB pode ser mobilizado para as folhas da cana-de-açúcar, provavelmente do Si solúvel da planta, pois, a maior parte do Si na planta está polimerizado ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) na parede celular das células da epiderme, permanecendo imóvel na planta (Mandlik et al., 2020).

O efeito acumulativo do Si verificado em nosso estudo se deve a alta eficiência na absorção do elemento pela cana-de-açúcar, especialmente devido o uso do Si solúvel, evitando ou diminuindo a polimerização do elemento (Oliveira, Prado, Felisberto, Checchio, et al., 2019). Outros efeitos também são importantes como a presença do sorbitol que estabiliza o Si evitando polimerização do elemento (Babiker & Duncan, 1974; Birchall, 1995), associada a acidificação da solução ($\text{pH} = 5,5$), que aumenta as espécies monoméricas do elemento (H_4SiO_4) (Kudryavtsev & Figovsky, 2016), favorecendo a absorção pela planta. Além disso, a cana-de-açúcar pertence à família Poaceae, que possui proteínas específicas com alta afinidade pelo Si, classificando a cultura como acumuladora do elemento (Mitani et al., 2009).

É conhecido que os processos fisiológicos vitais das plantas são beneficiados com o aumento da absorção do Si (Prado, 2021). Ficou evidenciado em nosso estudo o papel importante do fornecimento do Si no aumento dos teores de clorofila total e nos teores de carotenoides nas folhas das MPB (Figura 2b,c) (Experimento I), e nas folhas da cana-de-açúcar cultivada em campo (Figura 3b,c) (Experimento II), havendo destaque para as plantas do tratamento Si Fert e Si Muda+Fert. Assim, o aumento no conteúdo do Si nas MPB ou nas plantas em campo, demonstrou o papel deste elemento na estruturação dos cloroplastos, permitindo o incremento dos pigmentos fotossintéticos (Berger et al., 2007; Cao et al., 2015). Soma-se a isto, o fornecimento do Si diminuiu as perdas de energia na forma de fluorescência nas MPB (Figura 2d) (Experimento I), devido ao aumento da EQFII (F_v/F_m), possivelmente devido à atuação do elemento na manutenção da integridade do aparato fotossintético (Elsheery et al., 2020).

Outra importância do Si se deve a sua atuação no fortalecimento do sistema de defesa antioxidante das plantas (Kim et al., 2017). Evidenciamos que o fornecimento do Si promoveu aumento dos fenóis totais, tanto nas MPB na fase de viveiro (experimento I) (Figura 1e) como após o transplântio em campo (experimento II), com destaque para o tratamento Si Muda+Fert (Figura 3d). Os compostos fenólicos são antioxidantes importantes, pois atuam diminuindo a oxidação lipídica atenuando os danos as plantas (Mendonça et al., 2013), ou seja, melhora o sistema de defesa antioxidante. Este benefício do Si fica comprovado pois seu fornecimento diminuiu o extravasamento de eletrólitos celulares nas MPB (experimento I) (Figura 2f) e na cultura em campo (experimento II), destacando-se o tratamento Si Muda+Fert (Figura 3e). A diminuição do extravasamento de eletrólitos celulares nos tratamentos com o fornecimento de Si, está relacionada com o aumento do conteúdo do Si na planta e ocorre devido o elemento favorecer a integridade da membrana celular, conferindo maior resistência (Kim et al., 2017; Zhu et al., 2004).

Os efeitos do Si nos aspectos nutricionais e fisiológicos, resultaram em incremento da biomassa das MPB (Figura 2g) (Experimento I) e das variáveis biométricas da cultura no campo (Figura 4) (Experimento II), refletindo na produtividade da cana-de-açúcar. O comportamento das variáveis biométricas acompanhou o aumento do conteúdo do elemento nas plantas em campo, proporcionando maior altura do colmo (Figura 4a), maior número de perfilhos (Figura 4b), maior taxa de desdobra dos colmos (Figura 4c) e, conseqüentemente, a produtividade da cultura (Figura 4d), destacando-se o tratamento Si Muda+Fert, seguido dos tratamentos SiFert, mas o Si Foliar foi semelhante ao Si Muda. Desse modo, nossos dados corroboram com os presentes na literatura, que também evidenciaram aumento na produtividade da cana-de-açúcar a partir do aumento da altura do colmo e do número de perfilhos (Dingre & Gorantiwar, 2021; Santos et al., 2022; Wondimu et al., 2022), bem como devido ao aumento do conteúdo do Si na planta (Camargo et al., 2014).

Isso indica que o fornecimento do Si na fase de produção de MPB combinada com a fertirrigação do elemento após o transplântio da cultura para o campo, constitui um novo conceito para fertilização silicatada integrada na cultura da cana-de-açúcar. Isto se deve a eficiência deste método para a nutrição da planta, pois dobrou o

conteúdo de Si na planta em relação ao tratamento Controle e isso favoreceu os aspectos fisiológicos e de crescimento da planta, resultando em incremento de 16% na produtividade da cultura. Portanto, doses de Si relativamente baixas ($<2,4\text{kg ha}^{-1}$), empregadas de forma eficiente e uso de fonte solúvel, como silicato de sódio, reforçam a importância da qualidade da fonte para o uso do Si na cultura da cana-de-açúcar. Cabe destacar ainda que, do ponto de vista econômico, os silicatos são relativamente acessíveis, assumindo de 10 a 20% do custo de outros fertilizantes (Feng, 2000).

Destacamos que as MPB que foram enriquecidas com Si na fase de formação apresentaram resposta no campo semelhante as plantas de cana-de-açúcar que receberam o elemento apenas via aplicação foliar, sendo possível atribuir este comportamento aos benefícios do elemento no aumento no conteúdo do Si na planta que foi suficiente para aumentar pigmentos fotossintéticos (Figura 2b; Figura 3b). Portanto, apenas o uso de MPB enriquecida de Si substitui a aplicação do elemento no campo, evitando a necessidade de várias pulverizações foliares de Si, o que iria diminuir os custos de produção, indicando alta viabilidade.

Logo, os resultados apresentados indicam que todas as hipóteses deste estudo podem ser aceitas, pois observamos efeitos imediatos e residuais nas MPB enriquecidas com o Si (i), além das MPB apresentarem produtividade semelhante as plantas que receberam a pulverização foliar do elemento (ii). Em adição, constatamos que o uso de MPB enriquecidas com Si associado com a fertirrigação do elemento em campo se destaca no aumento da produtividade da cultura (iii), fato que podemos atribuir ao maior conteúdo do Si na planta, refletindo em melhorias fisiológicas e na produtividade da cana-de-açúcar (iv). Inclusive, isso foi reforçado pela forte correlação do conteúdo de Si nas plantas e os aspectos fisiológicos, bem como, com as variáveis de crescimento e de produtividade da cana-de-açúcar.

Os nossos resultados reforçam que o Si pode favorecer a cana-de-açúcar mesmo em condição sem estresse, fato também relatado por outros autores na própria cultura mas na fase de crescimento inicial (Frazão et al., 2020), e em outras espécies (Lozano-González et al., 2021; Silva et al., 2021; Silva & Prado, 2021). Portanto, embora existam muito mais trabalhos avaliando os benefícios do Si em plantas sob estresse, é possível que isso ocorra também em plantas sem estresse

(Cooke & Leishman, 2016). Isso atesta que em conjunto, a evidência é de que o Si deve ser incluído entre os elementos que têm grande influência na vida das plantas (Epstein, 1999). Assim, a nossa descoberta abre caminho para uso amplo do elemento nos cultivos da cana-de-açúcar, fortalecendo sua sustentabilidade.

Assim, este estudo propõe um sistema inédito que muda o conceito de fertilização com Si na cana-de-açúcar a partir de um programa integrado, iniciado pelo enriquecimento com Si na formação das MPB, transplantadas em campo, com fertirrigação do elemento na cultura, que deverá ter impacto direto na sustentabilidade do cultivo.

Pesquisas futuras podem avançar estudando os efeitos da fertirrigação de Si em campo com abordagens sistemáticas para integrar a nutrição das MPB com a cultura no campo, em diferentes solos e cultivares de cana-de-açúcar. Esta pesquisa abre pela primeira vez novas perspectivas para um programa de fertilização silicatada que integre a fase de produção de MPB e a fase de campo, ou seja, na produção de colmos mesmo sem estresse favorecendo o cultivo sustentável, beneficiando diferentes regiões do mundo que cultivam essa espécie e que empregam uso de MPB.

5 Conclusão

O fornecimento de Si na fase de formação de mudas pré-brotadas é eficiente em aumentar o conteúdo do elemento nas mudas, por favorecer a qualidade e a produção fotossintética, bem como maior desenvolvimento das plantas.

Esta pesquisa também demonstrou que a estratégia baseada no fornecimento de Si na fase de formação de muda, complementada com o fornecimento após o transplante proporciona maior conteúdo do elemento nas plantas, favorecendo o metabolismo da cultura e os aspectos biométricos, resultando em maior produtividade, e, aumentando a viabilidade e sustentabilidade desse sistema de produção.

6 Referências

Abdali H, Sahebi H, Pishvae M (2022) A sustainable robust optimization model to design a sugarcane-based bioenergy supply network: A case study. **Chemical**

Engineering Research and Design, 180, 265–284.
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.02.028>

Alokika, Anu, Kumar A, Kumar V, Singh B (2021) Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. **International Journal of Biological Macromolecules**, 169, 564–582.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.175>

Babiker AGT, Duncan HJ (1974) Penetration of bracken fronds by asulam as influenced by the addition of surfactant to the spray solution and by pH. **Weed Research**, 14(6), 375–377. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01078.x>

Barreto RF, Schiavon Júnior AA, Maggio MA, Prado RM (2017) Silicon alleviates ammonium toxicity in cauliflower and in broccoli. **Scientia Horticulturae**, 225(June), 743–750. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.08.014>

Barros TC, Prado RM, Roque CG, Arf MV, Vilela RG (2019) Silicon and salicylic acid in the physiology and yield of cotton. **Journal of Plant Nutrition**, 42(5), 458–465.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1567765>

Berger S, Sinha AK, Roitsch T (2007) Plant physiology meets phytopathology: Plant primary metabolism and plant-pathogen interactions. **Journal of Experimental Botany**, 58(15–16), 4019–4026. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm298>

Birchall JD (1995) The essentiality of silicon in biology. **Chemical Society Reviews**, 24(5), 351–357. <https://doi.org/10.1039/CS9952400351>

Camargo MS, Bezerra BKL, Vitti AC, Silva MA, Oliveira AL (2017) Silicon fertilization reduces the deleterious effects of water deficit in sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 17(1), 99–111. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000008>

Camargo MS, Keeping MG (2021) Silicon in sugarcane: availability in soil, fertilization, and uptake. **Silicon**, 13(10), 3691–3701. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00935-y>

Camargo MS, Korndörfer GH, Wyler P (2014) Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. **Field Crops Research**, 167, 64–75.

<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.07.009>

- Camargo MS, Rocha G, Baltieri GJ (2021) Silicate fertilization in sugarcane: silicon availability, uptake, and recovery index over two consecutive cycles. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 21(3), 2403–2411. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00531-y>
- Cao BL, Ma Q, Zhao Q, Wang L, Xu K (2015) Effects of silicon on absorbed light allocation, antioxidant enzymes and ultrastructure of chloroplasts in tomato leaves under simulated drought stress. **Scientia Horticulturae**, 194, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.037>
- Cooke J, Leishman MR (2016) Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. **Functional Ecology**, 30(8), 1340–1357. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12713>
- Dingre SK, Gorantiwar SD (2021) Soil moisture based deficit irrigation management for sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) in semiarid environment. **Agricultural Water Management**, 245(October 2020), 106549. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106549>
- Dionisio-Sese ML, Tobita S (1998) Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science**, 135(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00025-9)
- 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 and Biochemistry**, 149, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.035>
- Epstein E (1999) Silicon. **Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.**, 50, 641–664.
- Feng Y (2000) Siliceous fertilizer to become a new fertilizer product in expansion of agriculture in China. **J Chem Fert Ind**, 27, 9–11.
- Ferraz Junior ADN, Etchebehere C, Perecin D, Teixeira S, Woods J (2022) Advancing anaerobic digestion of sugarcane vinasse: Current development, struggles and future trends on production and end-uses of biogas in Brazil. **Renewable and**

- Sustainable Energy Reviews**, 157(December 2021).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112045>
- Frazão JJ, Prado RM, Souza Júnior JP, Rossatto DR (2020) Silicon changes C:N:P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. **Scientific Reports**, 10(1), 1–10.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-69310-6>
- Kim YH, Khan AL, Waqas M, Lee IJ (2017) Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: A review. **Frontiers in Plant Science**, 8(April), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00510>
- Kondörfer GH, Pereira HS, Nola A (2004) *Análise de silício: solo, planta e fertilizante*.
- Korndörfer GH, Pereira HS, Nolla A (2004) *Análise de silício: solo, planta e fertilizantes*. Universidade Federal de Uberlândia.
- Kozlov AV, Kulikova AH, Uromova IP (2021) Mobility of silicon, fertility of sod-podzolic soil, bioaccumulation of silicon and yields of agricultural crops under the influence of zeolite. **Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya**, 56(1), 183–198.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.1.183eng>
- Kudryavtsev PG, Figovsky OL (2016) Nanocomposite organomineral hybrid materials. **Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal**, 8(2), 20–44.
<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2016-8-2-20-44>
- Landell MGA, Campana MP, Figueiredo P, Xavier MA, Anjos IA, Dinardo-Miranda LL, Scarpari MS, Garcia JC, Bidóia MAP, Silva DN, Mendonça JR, Kanthack RAD, Campos MF, Brancalião SR, Petri RH, Miguel PEM (2012) Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas. **Instituto Agrônomo de Campinas, Documentos**, 17.
- Lichtenthaler HK (1987) Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. **Methods in Enzymology**, 148(C), 350–382.
[https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- Lozano-González JM, Valverde C, Hernández CD, Martín-Esquinas A, Hernández-

- Apaolaza L (2021) Beneficial effect of root or foliar silicon applied to cucumber plants under different zinc nutritional statuses. **Plants**, 10(12). <https://doi.org/10.3390/plants10122602>
- Mandlik R, Thakral V, Raturi G, Shinde S, Nikolić M, Tripathi DK, Sonah H, Deshmukh R (2020) Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. **Journal of Experimental Botany**, 71(21), 6703–6718. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>
- Mendonça AO, Tavares LC, Brunes AP, Monzón DLR, Villela FA (2013) Acúmulo de silício e compostos fenólicos na parte aérea de plantas de trigo após a adubação silicatada. **Bioscience Journal**, 29(5), 1154–1162.
- Mitani N, Yamaji N, Ma JF (2009) Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology**, 50(1), 5–12. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcn110>
- Oliveira Filho ASB, Prado RM, Teixeira GCM, Piccolo MC, Rocha AMS (2021) Water deficit modifies C:N:P stoichiometry affecting sugarcane and energy cane yield and its relationships with silicon supply. **Scientific Reports**, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00441-0>
- Oliveira KS, Prado RM, Checchio MV, Grato PL (2021) Silicon via nutrient solution modulates deficient and sufficient manganese sugar and energy cane antioxidant systems. **Scientific Reports**, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96427-z>
- Oliveira RLL, Prado RM, Felisberto G, Checchio MV, Grato PL (2019) Silicon Mitigates Manganese Deficiency Stress by Regulating the Physiology and Activity of Antioxidant Enzymes in Sorghum Plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 19(3), 524–534. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00051-w>
- Oliveira RLL, Prado RM, Felisberto G, Cruz FJR (2019) Different sources of silicon by foliar spraying on the growth and gas exchange in sorghum. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 19(4), 948–953. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00092-1>
- Prado RM (2021) *Mineral nutrition of tropical plants*. Springer International Publishing.

<https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4>

Raij Bvan, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (2001) *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*.

Rocha ILO, Prado RM, Oliveira KS, Silva DL, Abreu-Junior CH (2022) Foliar spraying of Mn with addition of Si increases phenolic compound, photosynthetic efficiency, productivity and the protein content of the soybean crop. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00780-5>

Santos LCN, Teixeira GCM, Prado RM, Rocha MAS, Pinto RCS (2020) Response of pre-sprouted sugarcane seedlings to foliar spraying of potassium silicate, sodium and potassium silicate, nanosilica and monosilicic acid. **Sugar Tech**, 22(5), 773–781. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00833-y>

Santos RL, Oliveira DMA, Santos RVS, Moura MJA, Guedes VHF, Barbosa JÁ, Lopes NRC, Costa LGAF, Silva JLF, Santos MBC, Freire FJ (2022) Nitrate Reductase Activity, Productivity and technological quality of sugarcane under molybdenum and nitrogen fertilization. **Sugar Tech**, 24(2), 463–472. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01026-x>

Savant NK, Korndörfer GH, Datnoff LE, Snyder GH (1999) Silicon nutrition and sugarcane production: A review. **Journal of Plant Nutrition**, 22(12), 1853–1903. <https://doi.org/10.1080/01904169909365761>

Silva EF, Moitinho MR, Teixeira DDB, Bicalho ES, Castioni GAF, Pereira GT, La Scala N (2020) Short-term spatiotemporal variation of soil CO₂ emission, temperature, moisture and aeration in sugarcane field reform areas under the influence of precipitation events. **Soil Use and Management**, 36(4), 658–670. <https://doi.org/10.1111/sum.12633>

Silva JLF, Prado RM (2021) Elucidating the action mechanisms of silicon in the mitigation of phosphorus deficiency and enhancement of its response in sorghum plants. **Journal of Plant Nutrition**, 44(17), 2572–2582. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1918155>

Silva DL, Prado RM, Tenesaca LFL, Silva JLF, Mattiuz BH (2021) Silicon attenuates

calcium deficiency in rocket plants by increasing the production of non-enzymatic antioxidants compounds. **Scientia Horticulturae**, 285(March). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110169>

Singleton VL, Rossi JA (1965) Phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, 16, 144–158.

Teixeira GCM, Prado RM, Rocha AMS (2021) Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water deficit damage in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, February, 1–10. <https://doi.org/10.1111/jac.12511>

Teixeira GCM, Prado RM, Rocha AMS, Piccolo MC (2020) Root-and foliar-applied silicon modifies C: N: P ratio and increases the nutritional efficiency of pre-sprouted sugarcane seedlings under water deficit. **PLoS ONE**, 15, 1–24. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240847>

Teixeira GCM, Prado RM, Rocha MAS, Santos LCN, Sarah MMS, Gratão PL, Fernandes C (2020) Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the effects of water deficit after transplanting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 20(3), 849–859. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00170-4>

Teixeira GCM, Prado RM, Rocha MAS, Sousa Junior GS, Gratão PL (2021) Beneficial effect of silicon applied through fertigation attenuates damage caused by water deficit in sugarcane. **Journal of Plant Growth Regulation**, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10510-3>

Wondimu A, Legesse H, Fite T (2022) Effects of Time Gap between Seed cane cutting to the planting of sugarcane varieties on growth parameter and yield of sugarcane (*Saccharum spp. hybrid*) at Finca'a Sugar Estate, Ethiopia. **Sugar Tech**, 24(2), 485–493. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01035-w>

Xavier MA, Landell MGA, Campana MP, Figueiredo P, Mendonça JR, Dinardo-Miranda LL, Scarpari MS, Garcia JC, Anjos IA, Azania CAM, Brancalhão SR, Kanthack RAD, Aferri G, Silva DN, Bidóia MAP, Campos MF, Perruco D, Matsuo RS, Neves JCT, Lorenzato CM (2014) Fatores de desuniformidade e kit de pré-brotção IAC para sistema de multiplicação de cana-de-açúcar – Mudanças Pré-

Brotadas (MPB). **Documentos IAC 113**, 28.

Yan G, Nikolic M, Ye M, Xiao Z, Liang Y (2018) Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. **Journal of Integrative Agriculture**, 17(10), 2138–2150. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62037-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62037-4)

Zhu Z, Wei G, Li J, Qian Q, Yu J (2004) Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Plant Science**, 167(3), 527–533. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.04.020>

CAPÍTULO 3 - Silício aplicado via fertirrigação se destaca da via foliar para aumentar produtividade e a qualidade do caldo de duas soqueiras de cana-de-açúcar cultivada em campo

RESUMO

Os ciclos de crescimento consecutivos dos canaviais proporcionam decréscimo na produção da soqueira da cana-de-açúcar. Assim, o uso do silício (Si) solúvel dependendo da forma de aplicação pode ser uma alternativa no aumento da produtividade e da qualidade do caldo, mas faltam pesquisas em soqueiras da cana-de-açúcar cultivada em campo. Para isso, realizou-se essa pesquisa com objetivo de verificar se o fornecimento de Si é capaz de incrementar a produtividade e a qualidade de duas soqueiras de cana-de-açúcar e os mecanismos biológicos envolvidos e se existe diferenças entre os modos de aplicação deste elemento. Foram realizados dois experimentos, na quarta e na nona soqueira de cana-de-açúcar cultivadas em campo em Latossolo Vermelho eutroférico típico, tendo os seguintes tratamentos: sem fornecimento de Si (Controle); Si fornecido via foliar (3 mmol L^{-1}) em três aplicações e Si fornecido via fertirrigação ($1,8 \text{ mmol L}^{-1}$) em nove aplicações durante o ciclo da cultura. Avaliaram-se os aspectos fisiológicos e de crescimento dos experimentos e a produtividade e qualidade do caldo. O fornecimento do Si proporcionou mecanismos benéficos na cana-de-açúcar, como aumento do conteúdo do elemento na planta, favorecendo os pigmentos fotossintetizantes e o sistema de defesa antioxidativo e consequentemente o desenvolvimento da cultura. O uso do Si via fertirrigação em soqueiras de cana-de-açúcar ao proporcionar aumento da produtividade com qualidade do caldo pode constituir em uma estratégia para aumentar a longevidade do canavial e a sustentabilidade do cultivo.

Palavras-chave: elemento benéfico, *Saccharum officinarum* L., fertirrigação, aplicação foliar

Silicon applied via fertigation stands out from the foliar route to increase productivity and juice quality of two field-grown sugarcane ratoons

ABSTRACT

The consecutive growth cycles of the cane fields provide a decrease in the production of sugarcane ratoon. Thus, the use of soluble silicon (Si) depending on the form of application can be an alternative to increase productivity and juice quality, but there is a lack of research on sugarcane ratoons cultivated in the field. For this, this research was carried out with the objective of verifying if the supply of Si is capable of increasing the productivity and quality of two sugarcane ratoons and the biological mechanisms involved and if there are differences between the modes of application of this element. Two experiments were carried out, in the fourth and ninth ratoons of sugarcane cultivated in the field in a Eutrutox Oxisol, with the following treatments: without Si supply (Control); Si supplied via foliar (3 mmol L^{-1}) in three applications and Si supplied via fertigation (1.8 mmol L^{-1}) in nine applications during the crop cycle. The physiological and growth aspects of the experiments and the productivity and quality of the broth were evaluated. The supply of Si provided beneficial mechanisms in sugarcane, such as an increase in the content of the element in the plant, favoring photosynthetic pigments and the antioxidant defense system and, consequently, the development of the crop. The use of Si via fertigation in sugarcane ratoons, by providing an increase in productivity with juice quality, can constitute a strategy to increase the longevity of the cane field and the sustainability of the crop.

Keywords: beneficial element, *Saccharum officinarum* L., fertigation, foliar application

1 Introdução

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene e pode atingir mais de dez ciclos de crescimento, sendo o primeiro ciclo a de cana-planta, porém, a maior parte do cultivo é de soqueiras (Xu et al., 2021). Assim, a produtividade da cultura da cana-de-açúcar durante o seu ciclo de produção completo é muito dependente do desempenho agrônômico das soqueiras da cultura.

Os ciclos de crescimento consecutivos dos canaviais proporcionam decréscimo na produção da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) ao longo do tempo (Silva et al., 2020), e apesar dos avanços no manejo da cultura, estudos continuam sendo realizados com a finalidade de se obter maior produtividade, e maior longevidade dos canaviais.

Neste cenário, o fornecimento de silício (Si) na cana-de-açúcar pode favorece-la, uma vez que esta cultura é acumuladora do elemento (Savant et al., 1999). Há relatos de efeitos da aplicação do Si em cana-de-açúcar, os quais descrevem que o elemento favorece o incremento de diferentes compostos antioxidantes, a exemplo dos compostos fenólicos (Oliveira et al., 2021), que podem atenuar estresses, evitando prejuízos fisiológicos e favorecendo o rendimento da cultura (Camargo et al., 2014).

Estudos realizados com Si em cana-de-açúcar em campo, utilizaram fontes do elemento de baixa solubilidade e com doses elevadas (em t ha^{-1}), havendo a necessidade de incorporar a fonte no solo, exigindo mecanização intensiva. Isso pode limitar o uso dessas fontes em soqueiras de cana-de-açúcar, pois não é possível a incorporação desta fonte de Si no solo, pois pode danificar o sistema radicular da cultura. Uma alternativa para o fornecimento do Si, seria o emprego de fontes solúveis, que não exige incorporação no solo.

A importância do uso de fontes solúveis de Si é o fato da redução das doses utilizadas por área serem relativamente baixas, pois empregam soluções diluídas, próximo de 2 mmol L^{-1} . Isso ocorre porque concentração de Si na solução acima de 3 mmol L^{-1} induz processo de polimerização do elemento (Oliveira et al., 2019) ou seja, forma polímeros de Si que não é absorvido pela planta.

O uso do Si solúvel em cana-de-açúcar tem sido realizado apenas durante o crescimento inicial da cultura, conhecida de primeiro ciclo ou cana-planta, e no máximo no segundo ciclo de crescimento, mas todas cultivadas em recipientes sob condição controlada. Nestes estudos tem indicado efeitos benéficos do Si na cana-planta, no entanto, cultivada sob déficit hídrico (Oliveira Filho et al., 2021; Teixeira et al., 2020a; Teixeira et al., 2020b; Teixeira et al., 2021), ou resultados incipientes em plantas sem estresse (Frazão et al., 2020). No entanto, não se sabe se esse efeito benéfico do Si solúvel no início do crescimento da cultura cultivada em vasos seria suficiente para aumentar a produtividade das soqueiras da cultura cultivada em campo dada a falta de estudos. E falta informações sobre o melhor método de aplicação de Si em campo pois isso vai afetar a absorção do elemento e consequentemente as respostas da cultura.

Em paralelo, é conhecido que as soqueiras da cana-de-açúcar, constitui um agente de estresse para a planta, devido os vários ciclos consecutivos. Assim, os danos que ocorrem com a cultura ao longo do tempo de cultivo proporciona menor rebrota das plantas, resultante de estresses que normalmente ocorre no campo, a exemplo do déficit hídrico (Xu et al., 2021). Assim, estresses ambientais, fisiológicos e fitotécnicos ao afetarem o primeiro estágio fenológico da cultura, que é a brotação, diminui o número de perfilhos e consequentemente, a produtividade da cana-de-açúcar.

Nestas circunstâncias, o Si por ser mitigador de estresses (Prado, 2021), pode atenuar tais efeitos, e favorecer o crescimento da cultura. Entretanto, faltam estudos para comprovar isso em soqueiras de cana-de-açúcar cultivada em campo e com o emprego de fonte solúvel de Si.

Assim, surge a hipótese de que o Si fornecido via fonte solúvel à soqueira de cana-de-açúcar em fase intermediária (quarto ano) ou ao final dos ciclos (nono ano), pode beneficiar a produtividade da cultura em campo e na qualidade do colmo por diminuir estresses, aumentando o teor de composto antioxidante. É possível que esse benefício do Si nas duas soqueiras seja evidenciado via fertirrigação por incrementar a absorção do elemento do que via foliar.

Para elucidar essa hipótese, realizou-se esse estudo objetivando-se verificar se o fornecimento de Si é capaz de incrementar a produtividade e a qualidade tecnológica de duas soqueiras de cana-de-açúcar, os mecanismos fisiológicos envolvidos, e se existem diferenças entre os modos de aplicação deste elemento.

2 Material e métodos

2.1 Local de estudo e condições de crescimento

Foram realizados dois experimentos na Fazenda Palmital, em Jaboticabal, estado de São Paulo, Brasil (21°10'24.762"S 48°17'19.838"W). O clima da região é classificado como tropical úmido (Aw), com verão úmido e inverno seco, segundo Köppen.

Os estudos foram realizados em campo, em mesmo período, em áreas com a cultura da cana-de-açúcar já implantada, sendo o Experimento I em área da cultivar CTC 9003 (4° ciclo de cultivo) e o Experimento II em área da cultivar CTC 20 (9° ciclo de cultivo), ambas desenvolvidas pelo Centro Tecnológico Canavieiro.

O solo das áreas experimentais foi classificado como Latossolo Vermelho eutroférico típico. Realizou-se coleta das amostras de solo da camada de 0 - 0,2m para realização de análise química para fins de fertilidade (Raij et al., 2001). O solo da área do Experimento I apresentou os seguintes resultados: pH (CaCl₂): 5,3; P (resina): 20,0 mg dm⁻³; matéria orgânica: 27 g dm⁻³; K: 0,8 mmol_c dm⁻³; Ca: 36 mmol_c dm⁻³; Mg: 8,0 mmol_c dm⁻³; H+Al: 31,0 mmol_c dm⁻³; Al: 0,0 cmol_c dm⁻³. Na área do Experimento II, com a análise química do solo obteve-se os seguintes resultados: pH (CaCl₂): 5,4; P (resina): 28,0 mg dm⁻³; matéria orgânica: 28 g dm⁻³; K: 0,9 mmol_c dm⁻³; Ca: 43 mmol_c dm⁻³; Mg: 14 mmol_c dm⁻³; H+Al: 33,0 mmol_c dm⁻³; Al: 0,0 cmol_c dm⁻³. O teor de Si disponível (extrator em CaCl₂) no solo das áreas do Experimento I e Experimento II foi 10 mg dm⁻³ em ambas as áreas, sendo determinado de acordo com o método colorimétrico (Kondörfer et al., 2004) e classificado como teor baixo (Camargo & Keeping, 2021).

Nas áreas, foi realizada adubação de cobertura, com aplicação 60 kg N ha^{-1} e $80 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$, empregando-se sulfato de amônio e cloreto de potássio como fontes de N e K_2O , respectivamente.

2.2 Tratamentos e delineamento experimental

Os dois experimentos foram submetidos aos mesmos tratamentos: sem fornecimento de Si (Controle); aplicação de Si foliar (SiFoliar) e fornecimento de Si via fertirrigação (SiFert), totalizando oito repetições, sendo as parcelas dispostas em blocos casualizados. As parcelas foram compostas por quatro linhas centrais, havendo 7m de comprimento cada, espaçamento de 1,5m entre linhas e de 3m entre parcelas. Assim, cada parcela perfazia uma área total de 42m^2 .

A aplicação do tratamento SiFert ($1,8 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si) foi realizado aos 90, 104, 116, 118, 124, 121, 131, 136 e 146 dias após a colheita, totalizando nove aplicações, logo após precipitação pluvial ($>20\text{mm}$). Em todas as nove fertirrigações, as aplicações foram direcionadas à linha de plantio, com solução contendo Si na quantidade equivalente a uma lâmina hídrica de 1,5 mm.

A aplicação do tratamento SiFoliar (3 mmol L^{-1}) teve início na fase de formação do colmo, quando a planta apresentava área foliar considerável, com 4 meses após o plantio, sendo realizadas três aplicações, em intervalo de 15 dias. As aplicações do tratamento SiFoliar foram realizadas com pulverizador uniport (Jactor 2030), sendo o pH da calda ajustado à $5,5 \pm 0,1$ com o uso do adjuvante agrícola Startec ($1 \text{ mL}/100 \text{ L}$ água), e vazão ajustada para 200 L de calda ha^{-1} . As aplicações ocorreram ao final do dia e com a umidade relativa do ar $\geq 60\%$, mensurada com o uso de termo-higrômetro. A determinação da dose de Si utilizada no tratamento SiFoliar seguiu recomendação da literatura (Teixeira, Prado, Rocha, & Piccolo, 2020). Em ambos os tratamentos a fonte de Si utilizada foi o silicato de sódio estabilizado com sorbitol ($169,7 \text{ g L}^{-1}$ de Si e $50,1 \text{ g L}^{-1}$ de Na).

Um dia antes de desmontar o experimento, foram coletadas 10 folhas +1 (primeira folha de cima para baixo, com bainha totalmente visível), por parcela. A coleta foi realizada às 6 h da manhã e as folhas foram acondicionadas em caixa de isopor com gelo com o intuito de preservar o material, que foi transportado para o

Laboratório de Nutrição de Plantas da Fcav/Unesp para a realização das análises fisiológicas. O experimento foi finalizado, com a realização das avaliações biométricas das plantas presentes nos 5 metros lineares da parte central da parcela, sendo todas as variáveis analisadas descritas a seguir.

2.3 Parâmetros avaliados

2.3.1 Pigmentos fotossintéticos

A determinação do teor de clorofila total e do de carotenoides foi realizada de acordo com o método proposto por Lichtenthaler (1987), sendo coletados no terço médio do limbo foliar dois discos de 6 mg. As leituras foram realizadas em um espectrofotômetro a 663 nm (clorofila a) e 470 nm (carotenoides); e o conteúdo, definido com base na matéria fresca.

2.3.2 Teor de compostos fenólicos

O teor foliar dos compostos fenólicos totais foi determinado através de reação colorimétrica e leitura em espectrofotômetro, de acordo com Singleton e Rossi (1965), sendo determinado em gramas equivalentes de ácido gálico (EAG) por grama de extrato.

2.3.3 Índice de extravasamento de eletrólitos celulares

Foram realizadas coletas de cinco discos foliares com diâmetro de 5mm, do terço médio de folhas +1. Os discos foram emergidos em 20 mL de água deionizada durante 2h. Em seguida foi realizada a leitura da condutividade elétrica inicial (C1). As amostras foram colocadas em autoclave a 121°C por 20 min, e após o resfriamento foi realizada a leitura da condutividade elétrica final (C2). As leituras foram realizadas com um medidor de condutividade elétrica (AK51, Akso, Brazil). O índice de extravasamento de eletrólitos celulares foi determinado através seguinte fórmula: $C1/C2 \times 100$ (Dionisio-Sese & Tobita, 1998).

2.3.4 Número de perfilhos, altura do colmo e produtividade

A determinação do número de perfilhos foi realizada a partir da sua contagem nos 5m da parte central das duas linhas centrais, sendo calculado para ser expresso em número de perfilhos em 1m. A altura dos colmos foi determinada com o uso de fita

métrica. Todos os colmos presentes na área útil das parcelas foram coletados e pesados, sendo assim estimada a produtividade por hectare.

2.3.5 Análises Tecnológicas

Foram coletados dez colmos de cada parcela para a avaliação da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. As avaliações da qualidade tecnológica foram realizadas na Associação dos Fornecedores de cana-de-açúcar de Guariba (Sosicana), determinando-se os açúcares redutores totais (°Brix) e o açúcar total recuperável (ATR), de acordo com o método descrito pela Consecana (2006).

2.3.6 Teor de Si em plantas de cana-de-açúcar

Foi realizada a coleta de 10 plantas por parcela. As plantas foram trituradas, e logo após, foi coletada amostras que foram acondicionadas em sacos de papel e foram levadas para secagem em estufa a $65\pm5^{\circ}\text{C}$. Ao atingirem massa constante, as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley. O teor de Si na parte área foi determinado a partir da digestão alcalina com NaOH e oxidação de carbono com H_2O_2 (Kraska e Breitenbeck, 2010) seguida por leitura em espectrofotômetro colorimétrico (Kondörfer et al., 2004).

2.4 Análise estatística

Os dados foram verificados quanto à normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e homogeneidade das variâncias (teste de Levene) e foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($p\leq 0,05$), e os valores médios dos tratamentos comparados pelo teste de LSD ($p=0,05$). As análises estatísticas foram realizadas por meio do software estatístico SAS® (Cary, NC, USA).

2.5 Análise multivariada

Foi realizada a análise de correlação de Pearson e plotado um correlograma. Posteriormente, realizou-se a análise de agrupamento hierárquica a partir da distância euclidiana utilizando o coeficiente de similaridade e o método de ligação simples (Single linkage) como algoritmo de conexão de grupo utilizando a linguagem de programação Python. E por fim, realizou-se a análise de componentes principais (PCA) a partir da matriz de covariância dos dados com auxílio da linguagem de programação Python (versão 3.9.7; Python Software Foundation).

3 Resultados

O fornecimento do Si via pulverização foliar (SiFoliar) foi eficiente em aumentar o teor de Si na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar, quando comparado com o tratamento controle (Figura 1a,b), em ambos os experimentos. No entanto, a fertirrigação com Si (SiFert), proporcionou maior teor do elemento na parte aérea das plantas, comparado aos demais tratamentos, nos canaviais de diferentes idades.

Observou-se que as plantas de cana-de-açúcar do tratamento SiFoliar apresentaram maior teor de clorofila total, e maior teor de carotenoides, em comparação as plantas do tratamento Controle, em ambos os canaviais. O tratamento SiFert proporcionou ainda maior incremento no teor de clorofila total (Figura 1c,d) e de carotenoides (Figura 1e,f), em comparação aos demais tratamentos, nos diferentes canaviais.

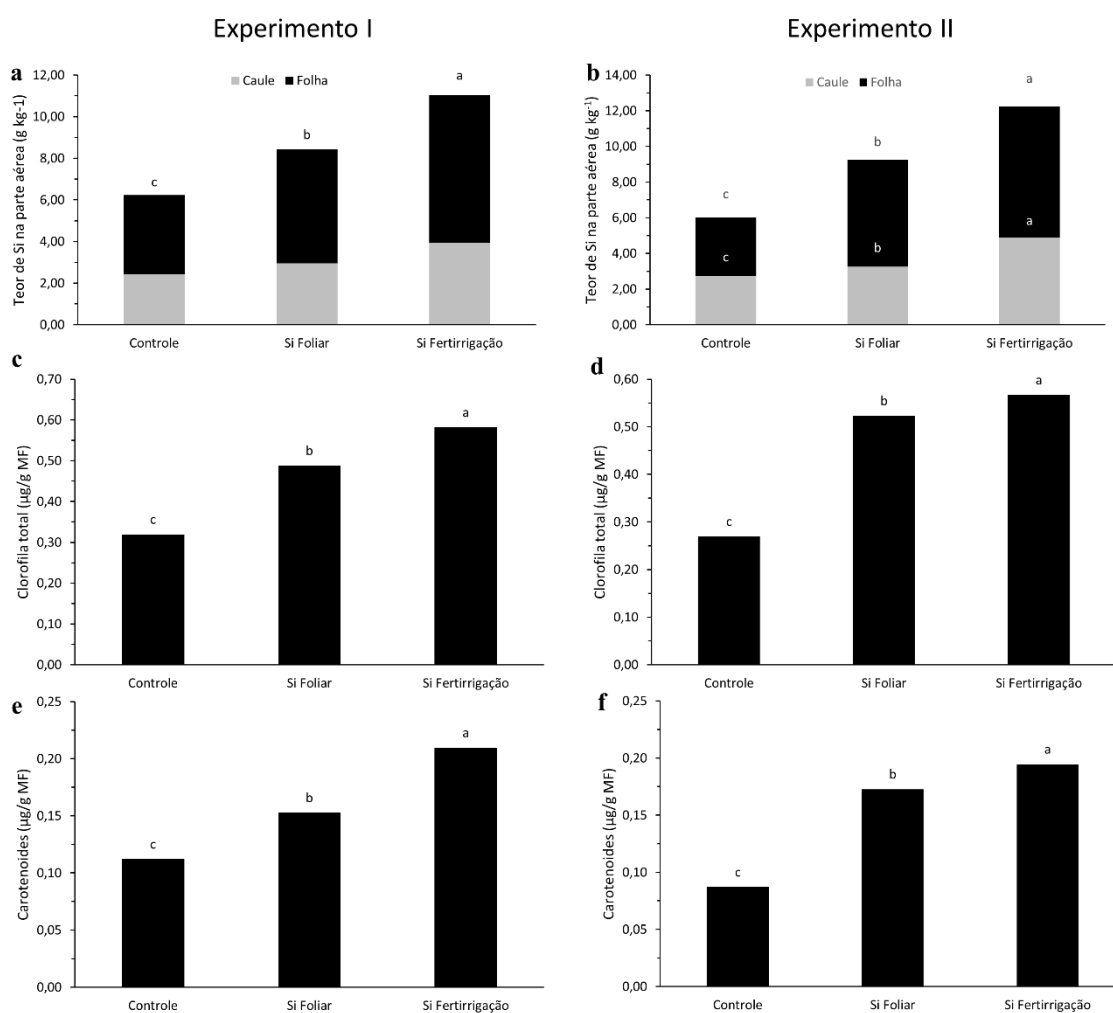


Figura 1. Teor de Si na parte aérea (a;b), teor de clorofila total (c;d) e teor de carotenoides (e;f) em plantas de cana-de-açúcar cultivadas sem fornecimento do elemento e com diferentes formas de fornecimento: sem fornecimento do Si (Controle); fornecimento do Si via pulverização foliar (Si Foliar) e fornecimento via fertirrigação no campo (Si Fertirrigação). As letras minúsculas diferem entre os tratamentos, de acordo com o teste LSD a 5% de probabilidade.

O tratamento Si Fert, em relação aos demais tratamentos, promoveu maior produção de fenóis totais (Figura 2a,b) e menor extravasamento de eletrólitos celulares (Figura 2c,d), em ambos os canaviais. Observa-se também que o tratamento Si Foliar, em relação ao tratamento Controle, apresentou maior produção de fenóis totais (Figura 2a,b) e menor índice de extravasamento de eletrólitos celulares, em ambos os cultivos (Figura 2c,d).

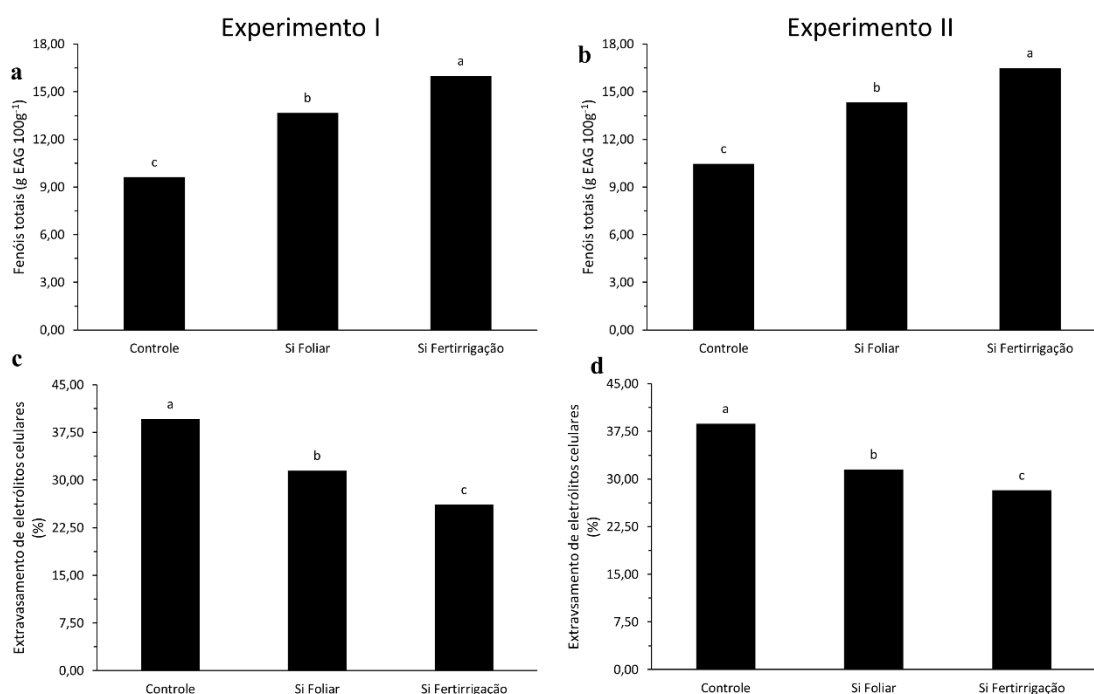


Figura 2. Teor de fenóis totais (a;b) e extravasamento de (c;d) em plantas de cana-de-açúcar cultivadas sem fornecimento do elemento e com diferentes formas de fornecimento: sem fornecimento do Si (Controle); fornecimento do Si via pulverização foliar (Si Foliar) e fornecimento via fertirrigação no campo (SiFert). As letras minúsculas diferem entre os tratamentos, de acordo com o teste LSD a 5% de probabilidade.

Nas avaliações biométricas, o tratamento Si Foliar apresentou maior número de perfilhos (Figura 3a,b), maior altura do colmo (Figura 3c,d) e maior produtividade (Figura 3e,f) quando comparado com o tratamento Controle (Figura 3). No entanto, o tratamento Si Fert destacou-se dos demais tratamentos nestas variáveis, apresentando maior número de perfilhos (Figura 3a,b), maior altura do colmo (Figura 3c,d) e maior produtividade (Figura 3e,f).

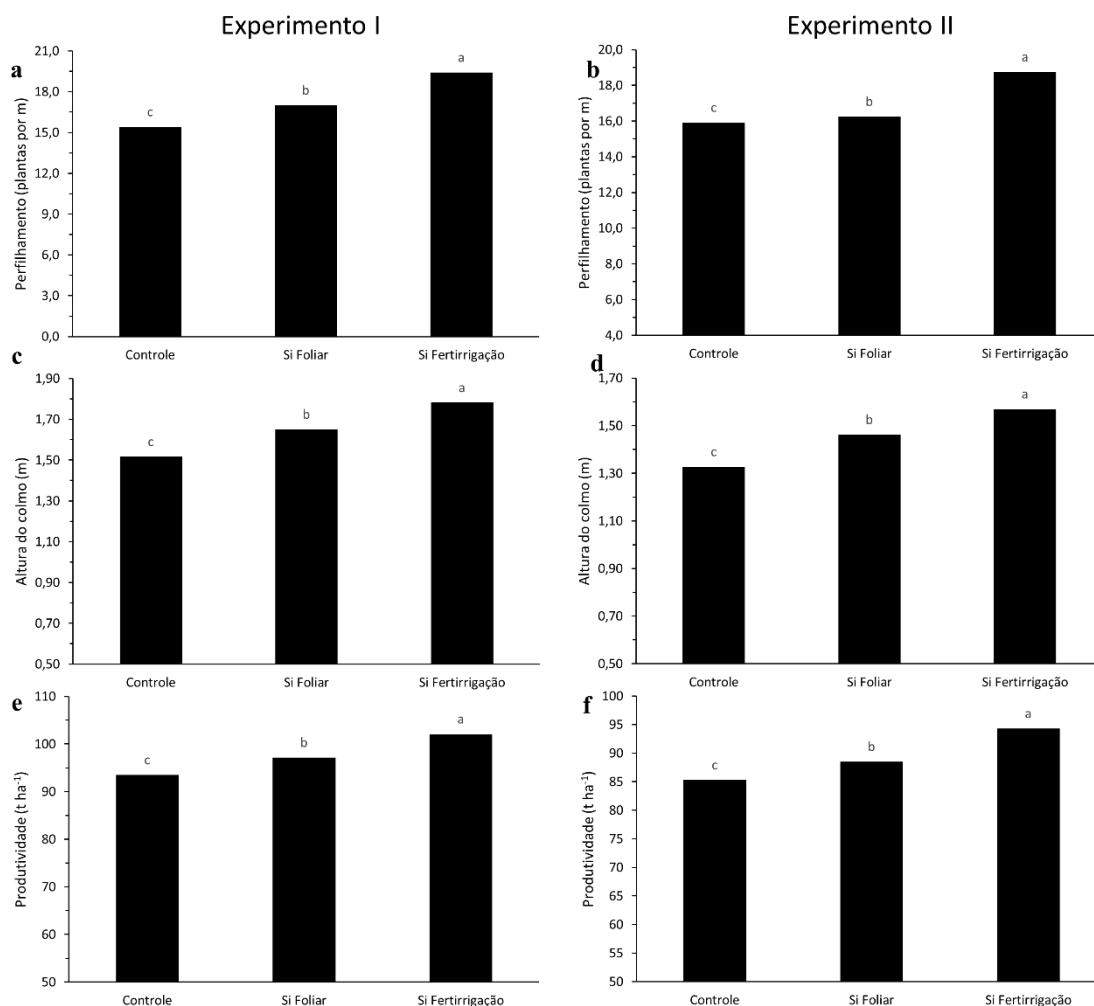


Figura 3. Perfilhamento (a;b), altura do colmo (c;d) e produtividade (e;f) em plantas de cana-de-açúcar cultivadas sem fornecimento do elemento e com diferentes formas de fornecimento: sem fornecimento do Si (Controle); fornecimento do Si via pulverização foliar (Si Foliar) e fornecimento via fertirrigação no campo (SiFert). As letras minúsculas diferem entre os tratamentos, de acordo com o teste LSD a 5% de probabilidade.

Nas avaliações tecnológicas, o tratamento Si Fertirrigado, em relação aos demais tratamentos, promoveu maior produção °Brix (Figura 4a,b) e maior produção

de açúcar total recuperável (Figura 4c,d), em ambos os experimentos. Observa-se também que o tratamento Si Foliar, em relação ao tratamento Controle, apresentou maior produção de °Brix (Figura 4a,b) e produção de açúcar total recuperável, em ambos os cultivos (Figura 4c,d).

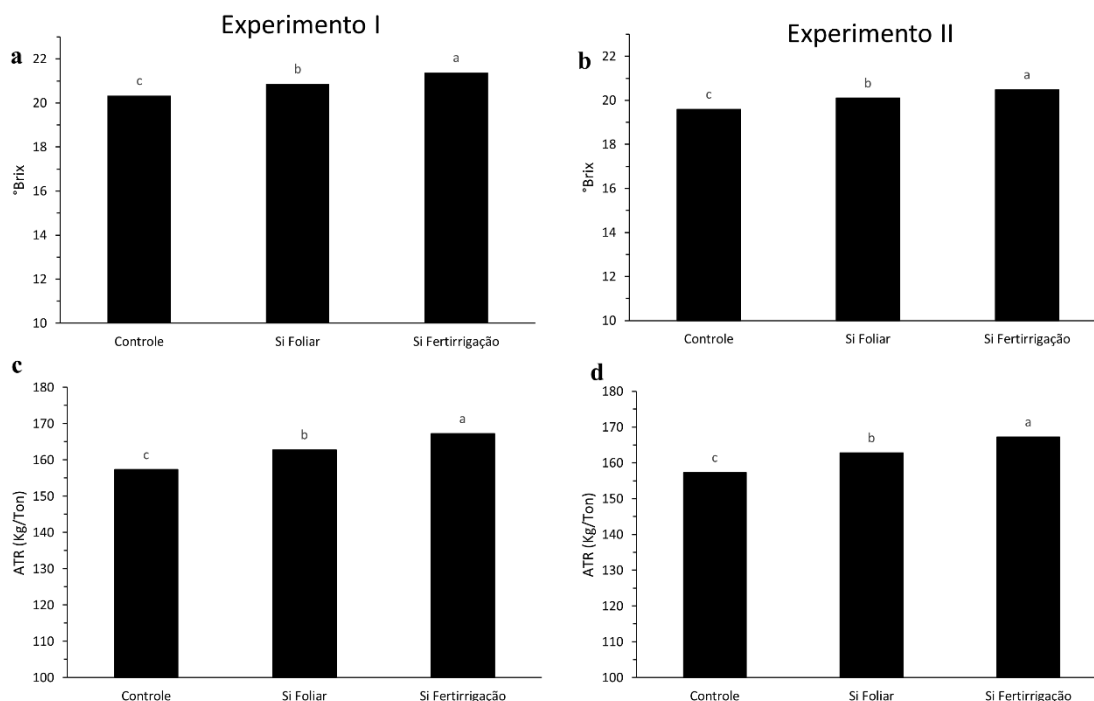


Figura 4. °Brix (a;b) e açúcar total recuperável (ATR) (c;d) em plantas de cana-de-açúcar cultivadas sem fornecimento do elemento e com diferentes formas de fornecimento: sem fornecimento do Si (Controle); fornecimento do Si via pulverização foliar (Si Foliar) e fornecimento via fertirrigação no campo (Si Fertirrigado). As letras minúsculas diferem entre os tratamentos, de acordo com o teste LSD a 5% de probabilidade.

Para análise de agrupamento hierárquico, verificou-se que os dois ciclos compartilharam o mesmo comportamento, indicando que o extravasamento de eletrólitos foi associado ao tratamento controle, enquanto a clorofila total, fenóis, altura de plantas, concentração de Si, carotenoides, perfilhamento, Brix, ATR e a produtividade foram associados mais fortemente ao tratamento fertirrigado com Si e moderadamente aos tratamentos com aplicação foliar de Si (Figura 5).

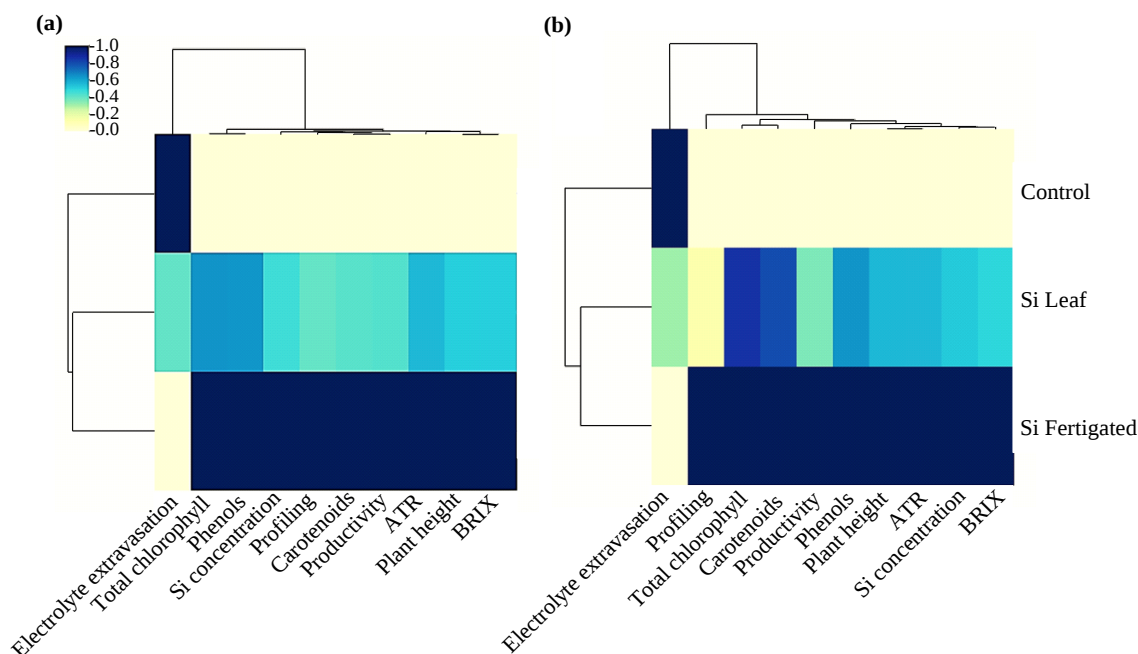


Figura 5. Mapa de calor hierarquicamente agrupado das variáveis de concentração de Si, clorofila total, carotenoides, extravasamento de eletrólitos, fenóis, perfilhamento, altura das plantas, ATR e BRIX e produtividade em plantas de cana-de-açúcar de 4º (a) e 9º ciclo de crescimento, cultivadas sem fornecimento do elemento e com diferentes formas de fornecimento: sem fornecimento do Si (Controle); fornecimento do Si via pulverização foliar (Si Foliar) e fornecimento via fertirrigação no campo (Si Fertirrigado).

As análises de componentes principais (PCA) do quarto e nono ciclo de cultivo da cana-de-açúcar foram capazes de explicarem 91,3 e 91,8% (componente principal 1 + 2), respectivamente (Figuras 6a, b). Para PCA no quarto ciclo de cultivo, a concentração de Si, clorofila total, carotenoides, fenóis, extravasamento de eletrólitos, altura de planta, produtividade, Brix e ATR contribuíram para explicar a variância em PC1, enquanto perfilhamento contribuiu para explicar em PC2 (Figura 6a). Para PCA no nono ciclo de cultivo, a PC1 foi explicada pela concentração de Si, fenóis, extravasamento de eletrólitos, altura de planta, Brix e ATR e PC2 foi explicado por perfilhamento e clorofila total, enquanto carotenoides e produtividade contribuíram com valores médios para explicar a variância em PC1 e PC2 (Figura 6b). Para o tratamento controle, independentemente do ciclo de cultivo, foi caracterizados maiores valores de extravasamento de eletrólitos, enquanto os maiores valores de clorofila total, carotenoides, fenóis, concentração de Si, altura de planta, perfilhamento, ATR e

BRIX e produtividade foram associados aos tratamentos que receberam aplicação de Si (fertilização ou aplicação foliar) (Figura 6).

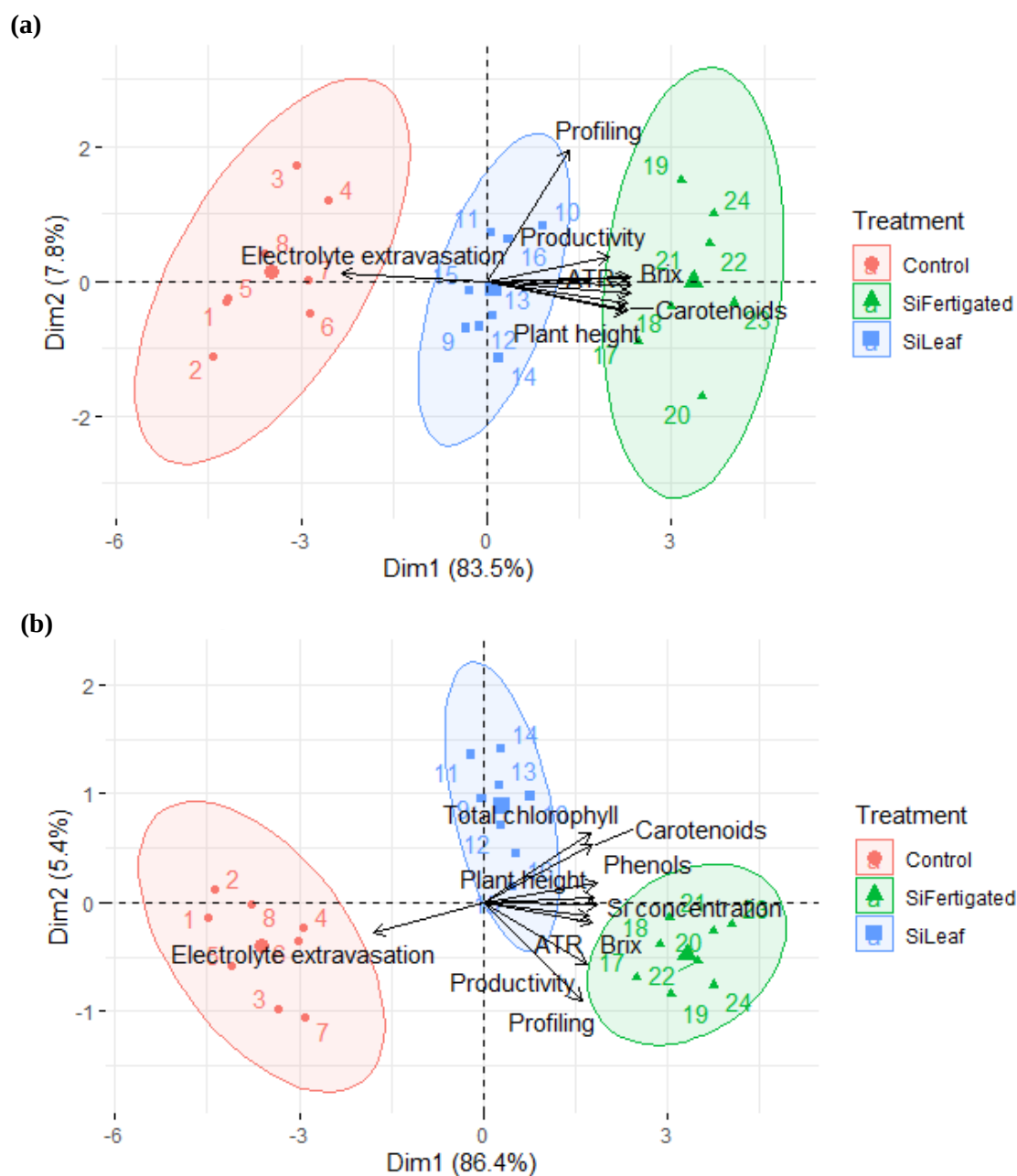


Figura 6. Análises de componentes principais das variáveis de concentração de Si, clorofila total, carotenoides, extravasamento de eletrólitos, fenóis, perfilhamento, altura das plantas e produtividade em plantas de cana-de-açúcar de 4º (a) e 9º ciclo de crescimento, cultivadas sem fornecimento do elemento e com diferentes formas de fornecimento: sem fornecimento do Si (Controle); fornecimento do Si via pulverização foliar (Si Foliar) e fornecimento via fertilização no campo (Si Fertilizado).

4 Discussão

Nos dois experimentos, o incremento na concentração do Si nas folhas e nos colmos (Figuras 1a e 1c) é reflexo do aumento da absorção deste elemento pelas plantas de cana-de-açúcar, que apresentam transportadores eficientes para absorção do Si (LSi1 e LSi2) (Wang et al., 2021). Os nossos resultados desvendam que as soqueiras de cana-de-açúcar em quatro e nove ciclos de crescimento são responsivas ao fornecimento de Si, alterando a sua concentração nas folhas e nos caules da cultura.

O maior efeito na modificação das concentrações de Si na parte aérea das plantas ocorreu pela fertirrigação com Si, devido ao aumento do teor do elemento na planta. Isso ocorreu como resultado do maior contato Si-raiz induzido pelo aumento da transpiração das plantas dada a maior disponibilidade de água, aumentando o fluxo de massa do elemento no solo e, conseqüentemente, a absorção de Si (Cramer et al., 2009). A maior eficiência da fertirrigação comparada com adubação foliar é decorrente da concentração de Si estudada ($1,8\text{mmol L}^{-1}$), que, quando presente na solução do solo, apresenta baixa perdas do elemento pelo processo da polimerização (Schaller et al., 2021) ou por lixiviação (Camargo & Keeping, 2021), permitindo, maior absorção radicular do Si pela cultura. Na aplicação foliar, o órgão folha apresenta limitação para a absorção de Si, e paralelamente, o tempo de fornecimento é curto perante o ciclo da cultura e o elemento é imóvel na planta, uma vez que está localizado apenas nas folhas que receberam a pulverização foliar (Prado, 2021).

Apesar do aumento dos benefícios da maior estabilidade do Si na solução na superfície das folhas, a fertirrigação permanece como melhor alternativa para o fornecimento de Si, pois possibilita maior período para absorção do elemento pelas raízes da cana-de-açúcar, pois apresentam transportadores eficientes (Wang et al., 2021). Entretanto, os nossos resultados revelam que, apesar da limitação da absorção foliar, a aplicação é suficiente para promover incremento na absorção do Si em relação as plantas controle. Tais resultados, indicam a viabilidade para cultivo na ausência da fertirrigação, principalmente pela sua viabilidade econômica, ou seja, tem baixo custo pelas doses relativamente baixa normalmente aplicada e sem necessidade de instalação de sistemas de irrigação.

No mais, os estresses abióticos provocado pelos ciclos de crescimento das plantas de cana-de-açúcar causa baixa produtividade dos canaviais após cada ciclo, visto nas plantas do tratamento Controle (Figuras 3e e 3f). Isso ocorre porque nestas plantas tem-se aumento da produção de espécies reativas de oxigênio, provocando prejuízos biológicos diretos nas células, principalmente na degradação de pigmentos fotossintéticos (Frazão et al., 2020; Verma et al., 2021).

O fornecimento de Si melhorou a performance das plantas de cana-de-açúcar, principalmente incrementando a concentração dos pigmentos fotossintéticos (clorofila e carotenoides) (Frazão et al., 2020) devido à atuação do Si na estrutura dos cloroplastos (Cao et al., 2015) e na preservação da síntese de clorofila (Berger et al., 2007) tendo papel essencial na absorção e transmissão da energia luminosa. Estes efeitos do Si foram confirmados em soqueiras de cana-de-açúcar no quarto e no nono ciclo de crescimento, indicando que em plantas com maior estresse proveniente dos vários ciclos, os benefícios do Si tornam-se presentes.

Estes efeitos benéficos do Si se devem ao seu papel bioquímico em diminuir o estresse oxidativo nas plantas de cana-de-açúcar nos diferentes ciclos de crescimento constatado pela diminuição da taxa de extravasamento de eletrólitos (Figuras 2c e 2d). Esse efeito do Si diminui a produção do subproduto da peroxidação lipídica (malondialdeído) havendo maior integridade física das membranas celulares (Camargo et al., 2019). Isso ocorre devido à ação do Si em incrementar a produção de compostos antioxidantes como carotenoides e fenóis, neutralizando as espécies reativas de oxigênio (Deshmukh et al., 2017; Majumdar & Prakash, 2020). Nesse cenário, reforça o efeito antioxidante do Si reduzindo o estresse oxidativo nas soqueiras de quarto e nono ano de cultivo melhorando os aparatos fotossintéticos e, consequentemente, a performance das soqueiras de cana-de-açúcar.

Tais evidências são observados pela análise de agrupamento hierárquico e PCA, que associa o aumento da clorofila total, carotenoides e fenóis aos tratamentos que receberam suprimento de Si (Figuras 5 e 6). Adicionalmente, as análises de agrupamentos hierárquicos e PCA, evidenciaram que o aumento do extravasamento de eletrólitos foi associado a ausência da aplicação do Si (Figuras 5 e 6), indicando o papel do Si em atenuar os efeitos deletérios do estresse resultante dos ciclos

consecutivos em cultivos mais avançados de cana-de-açúcar. Assim, comprovam-se os mecanismos que induziram a melhoria da performance das plantas supridas de Si, aumentando o perfilhamento, altura e a produtividade no quarto e nono ano de cultivo.

A melhor performance das plantas de cana-de-açúcar, também provocou incremento do ATR e °Brix, associado ao incremento em condições de suprimento de Si (Figuras 5 e 6). Esses resultados, podem ser provocados pela função biológica do Si no armazenamento e retenção de sacarose, diminuindo a atividade da invertase ácida em folhas maduras e aumentando a atividade da invertase neutra nos estádios de alongamento e maturidade (Liang et al., 2015).

Nesse cenário, o Si melhora os mecanismos de atenuação dos estresses nas plantas de cana-de-açúcar, as respostas biométricas de altura e perfilhamento e a produtividade da cana-de-açúcar. Adicionalmente, os nossos resultados desvendam que a atuação do Si não se restringe somente no aumento da produtividade, mas no aumento da qualidade do tecnológica do caldo da cana-de-açúcar.

Os resultados em condições controladas na ausência de estresse indicando efeito do Si solúvel no incremento do crescimento da cana-de-açúcar, foram relatados (Frazão et al., 2020; Souza Júnior et al., 2022), e até mesmo em condições de campo nos primeiros ciclos de cultivo mas usando fontes de Si de baixa solubilidade (Camargo et al., 2021). No entanto, não se conhecia os efeitos benéficos do Si usando fontes solúveis em soqueiras com ciclos de cultivos mais avançados e os resultados obtidos permitem confirmar a nossa primeira hipótese reforçando viabilidade do uso deste elemento nas soqueiras. Além disso, o nosso estudo indica que a fertirrigação com Si é a forma de suprimento mais eficiente, comparada a aplicação foliar, aumentando a intensidade dos benefícios do Si em atenuar o estresse provocado pelos ciclos consecutivos e incrementar a produtividade da cultura em ciclos avançados, portanto, aceita-se a nossa segunda hipótese.

Uma informação adicional da aplicação foliar de Si, em relação as plantas Controle, é que também é uma prática agrônômica capaz de melhorar a performance das soqueiras de cana-de-açúcar em ciclos intermediários ou avançados, melhorando, os benefícios do elemento incrementando a produtividade da cultura.

Essa forma de aplicação de Si pode ser uma estratégia benéfica para soqueiras de cana-de-açúcar em áreas que não é possível usar a fertirrigação.

Os resultados dessa pesquisa abrem caminhos para ampliar a longevidade das soqueiras, tendo maior produtividade e qualidade do caldo, favorecendo sustentabilidade do cultivo da cana-de-açúcar.

5 Conclusão

O fornecimento do Si proporcionou mecanismos benéficos na cana-de-açúcar, como aumento do conteúdo do elemento na planta, favorecendo os pigmentos fotossintetizantes e o sistema de defesa antioxidativo e consequentemente o desenvolvimento da cultura.

O uso do Si via fertirrigação em soqueiras de cana-de-açúcar, ao proporcionar aumento da produtividade e da qualidade do caldo, pode constituir em uma estratégia para aumentar a longevidade do canavial e a sustentabilidade do cultivo.

6 Referências

- Berger S, Sinha AK, Roitsch T (2007) Plant physiology meets phytopathology: Plant primary metabolism and plant-pathogen interactions. **Journal of Experimental Botany**, 58(15–16), 4019–4026. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm298>
- Camargo MS, Bezerra BKL, Holanda LA, Oliveira AL, Vitti AC, Silva MA (2019) Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 19(1), 81–91. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>
- Camargo MS, Keeping MG (2021) Silicon in sugarcane: availability in soil, fertilization, and uptake. **Silicon**, 13(10), 3691–3701. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00935-y>
- Camargo MS, Korndörfer GH, Wyler P (2014) Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. **Field Crops Research**, 167, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.07.009>

- Camargo MS, Rocha G, Baltieri GJ (2021) Silicate fertilization in sugarcane: silicon availability, uptake, and recovery index over two consecutive cycles. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 21(3), 2403–2411. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00531-y>
- Cao BL, Ma Q, Zhao Q, Wang L, Xu K (2015) Effects of silicon on absorbed light allocation, antioxidant enzymes and ultrastructure of chloroplasts in tomato leaves under simulated drought stress. **Scientia Horticulturae**, 194, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.037>
- Cramer MD, Hawkins HJ, Verboom GA (2009) The importance of nutritional regulation of plant water flux. **Oecologia**, 161(1), 15–24. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1364-3>
- Deshmukh RK, Ma JF, Bélanger RR (2017) Role of silicon in plants. In **Frontiers in Plant Science** (Vol. 8). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01858>
- Dionisio-Sese ML, Tobita S (1998) Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science**, 135(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00025-9)
- Frazão JJ, Prado RM, Souza Júnior JP, Rossatto DR (2020) Silicon changes C:N:P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. **Scientific Reports**, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69310-6>
- Kondörfer GH, Pereira HS, Nola A (2004) *Análise de silício: solo, planta e fertilizante*.
- Kubicki JD, Heaney PJ (2003) Molecular orbital modeling of aqueous organosilicon complexes: Implications for silica biomineralization. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 67(21), 4113–4121. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00093-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00093-3)
- Liang Y, Nikolic M, Bélanger R, Gong H, Song A (2015) Silicon in Agriculture. In **Annals of the Royal College of Surgeons of England** (Vol. 22, Issue 1). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2>
- Lichtenthaler HK (1987) Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic

- Biomembranes. **Methods in Enzymology**, 148(C), 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- Majumdar S, Prakash NB (2020) An overview on the potential of silicon in promoting defence against biotic and abiotic stresses in sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 20(4), 1969–1998. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00269-z>
- Marafon AC, Endres L (2013) Silicon: fertilization and nutrition in higher plants. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, 56(4), 380–388. <https://doi.org/10.4322/rca.2013.057>
- Oliveira Filho ASB, Prado RM, Teixeira GCM, Piccolo MC, Rocha AMS (2021) Water deficit modifies C:N:P stoichiometry affecting sugarcane and energy cane yield and its relationships with silicon supply. **Scientific Reports**, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00441-0>
- Oliveira KS, Prado RM, Checchio MV, Gratão PL (2021) Silicon via nutrient solution modulates deficient and sufficient manganese sugar and energy cane antioxidant systems. **Scientific Reports**, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96427-z>
- Oliveira RLL, Prado RM, Felisberto G, Checchio MV, Gratão PL (2019) Silicon Mitigates Manganese Deficiency Stress by Regulating the Physiology and Activity of Antioxidant Enzymes in Sorghum Plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 19(3), 524–534. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00051-w>
- Prado RM (2021) *Mineral nutrition of tropical plants*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4>
- Raij B, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (2001) *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*.
- Savant NK, Korndörfer GH, Datnoff LE, Snyder GH (1999) Silicon nutrition and sugarcane production: A review. **Journal of Plant Nutrition**, 22(12), 1853–1903. <https://doi.org/10.1080/01904169909365761>
- Schaller J, Puppe D, Kaczorek D, Ellerbrock R, Sommer M (2021) Silicon cycling in

- soils revisited. **Plants**, 10(2), 1–36. <https://doi.org/10.3390/plants10020295>
- Silva EF, Moitinho MR, Teixeira DDB, Bicalho ES, Castioni GAF, Pereira GT, La Scala N (2020) Short-term spatiotemporal variation of soil CO₂ emission, temperature, moisture and aeration in sugarcane field reform areas under the influence of precipitation events. **Soil Use and Management**, 36(4), 658–670. <https://doi.org/10.1111/sum.12633>
- Singleton VL, Rossi JA (1965) Phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, 16, 144–158.
- Souza Júnior JP, Oliveira TL, Prado RM, Oliveira KR, Soares MB (2022). Analyzing the role of silicon in leaf C:N:P stoichiometry and its effects on nutritional efficiency and dry weight production in two sugarcane cultivars. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00836-6>
- Souza Júnior JP, Prado RM, Campos CNS, Oliveira DF, Cazetta JO, Detoni JA (2022) Silicon foliar spraying in the reproductive stage of cotton plays an equivalent role to boron in increasing yield, and combined boron-silicon application, without polymerization, increases fiber quality. **Industrial Crops and Products**, 182(December 2021). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114888>
- Souza Junior JP, Prado RM, Soares MB, Silva JLF, Guedes VHF, Sarah MMS, Cazetta JO (2021) Effect of different foliar silicon sources on cotton plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 21(1), 95–103. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00345-4>
- Teixeira GCM, Prado RM, Rocha MAS, Piccolo MC (2020) Root-and foliar-applied silicon modifies C: N: P ratio and increases the nutritional efficiency of pre-sprouted sugarcane seedlings under water deficit. **PLoS ONE**, 15, 1–24. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240847>
- Teixeira GCM, Prado RM, Rocha MAS, Santos LCN, Sarah MMS, Gratão PL, Fernandes C (2020) Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the effects of water deficit after transplanting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 20(3), 849–859. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00170-4>

- Teixeira GCM, Prado RM, Rocha MAS, Sousa Junior GS, Gratão PL (2021) Beneficial effect of silicon applied through fertigation attenuates damage caused by water deficit in sugarcane. **Journal of Plant Growth Regulation**, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10510-3>
- Wang M, Wang R, Mur LAJ, Ruan J, Shen Q, Guo S (2021) Functions of silicon in plant drought stress responses. **Horticulture Research**, 8(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41438-021-00681-1>
- Xu F, Wang Z, Lu G, Zeng R, Que Y (2021) Sugarcane ratooning ability: research status, shortcomings, and prospects. **Biology**, 10(10), 1052. <https://doi.org/10.3390/biology10101052>