

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**IMPACTO RESIDUAL DA FERTIRRIGAÇÃO COM SILÍCIO NA BROTAÇÃO
E NA PRODUTIVIDADE DA SOQUEIRA DA CANA-DE-AÇÚCAR
CULTIVADA COM E SEM DÉFICIT HÍDRICO**

Aluno: Alan Moretto Ferreira de Aguiar

Orientador: Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: MSc. Milton Garcia
Costa

Jaboticabal
2025

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**IMPACTO RESIDUAL DA FERTIRRIGAÇÃO COM SILÍCIO NA BROTAÇÃO
E NA PRODUTIVIDADE DA SOQUEIRA DA CANA-DE-AÇÚCAR
CULTIVADA COM E SEM DÉFICIT HÍDRICO**

Alan Moretto Ferreira de Aguiar

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: MSc. Milton Garcia Costa

Trabalho apresentado à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP,
Câmpus de Jaboticabal, para graduação em
ENGENHARIA AGRONÔMICA.

Jaboticabal - SP

1º Semestre/2025

M845i	Moretto Ferreira de Aguiar, Alan Impacto residual da fertirrigação com Silício na brotação e na produtividade da soqueira da cana-de-açúcar cultivada com e sem déficit hídrico / Alan Moretto Ferreira de Aguiar. -- Jaboticabal, 2025 48 p. : il., tabs. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Renato de Mello Prado Coorientador: Milton Garcia Costa 1. Saccharum officinarum. 2. Déficit hídrico. 3. Nutrição silicatada. 4. Efeito residual. I. Título.
-------	--

ALAN MORETTO FERREIRA DE AGUIAR

**IMPACTO RESUDUAL DA FERTIRRIGAÇÃO COM SILÍCIO NA BROTAÇÃO E
NA PRODUTIVIDADE DA SOQUEIRA DA CANA-DEAÇÚCAR CULTIVADA COM
E SEM DÉFICIT HÍDRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: M.Sc. Milton Garcia Costa

Área de Concentração: Nutrição de Plantas

Data da defesa: 21/03/2025

(X) Aprovado

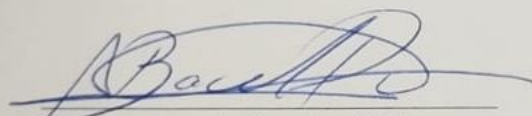
() Reprovado

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br RENATO DE MELLO PRADO
Data: 19/05/2025 15:57:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Renato de Mello Prado

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal


Prof. Dr. Alexandre Barcellos Dalri

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

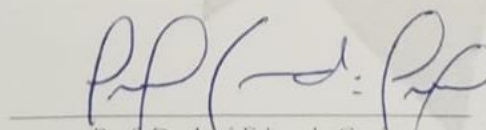
Documento assinado digitalmente
gov.br KAMILA SILVA OLIVEIRA
Data: 25/06/2025 08:39:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Kamilla Silva Oliveira

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em:

26 / 06 / 2025


Prof. Dr. José Eduardo Corá
Chefe do Departamento de Ciência do Solo

**Aprovado Ad Referendum do
Conselho do Departamento**

Oferecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Renato de Mello Prado e coorientador MSc. Milton Garcia Costa, devido a todo suporte em minha trajetória acadêmica desde que ingressei na universidade, ensinamentos e por todas as oportunidades que me proporcionaram a partir da iniciação científica. Também, gostaria de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por financiar esse projeto de pesquisa.

Agradecimentos

A execução deste Trabalho de Conclusão de Curso foi apenas permitida em razão do suporte e empenho de várias pessoas que, de distintas formas, ajudaram para que essa fase fosse obtida. A princípio, agradeço a Deus, por me proporcionar conhecimento e força durante toda essa etapa, o que foi fundamental em cada momento.

Aos meus pais, Sandra Mara Moretto de Aguiar e Ubirajara Ferreira de Aguiar e as minhas tias Solange Aparecida Moretto e Gina Isabel de Aguiar que durante todo o período de graduação me deram suporte para permanecer na Universidade e confiaram no meu potencial. Vocês foram motivo para eu me esforçar ao máximo com o intuito de dar orgulho e acredito que estou conseguindo cumprir esse objetivo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Renato de Mello Prado, ao meu coorientador M.Sc. Milton Garcia Costa e a todos os integrantes que pude trabalhar em conjunto dentro do grupo GENPLANT, agradeço primeiramente por todas as oportunidades que me proporcionaram desde que ingressei na Universidade e que ainda podem me proporcionar, pela paciência em cada momento do nosso trabalho, pelos conhecimentos adquiridos durante esse período e às demais contribuições que permitiram a finalização dessa pesquisa com sucesso. Vocês são excelentes e inspiradores profissionais. Também, gostaria de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por financiar esse projeto de pesquisa.

Aos meus amigos que fiz na Universidade, aos amigos do grupo PET AGRO e principalmente aos amigos que morei na república e a minha amiga Joice Mendonça de Souza que estiveram presentes todos os momentos durante o período de graduação, agradeço muito pelo apoio, boa influência para os estudos e aprendizados. Sem vocês essa jornada não seria a mesma.

A todos, aqui está minha mais sincera expressão de agradecimento. Cada um de vocês foi fundamental para eu estar concluindo essa etapa.

Sumário

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
3. MATERIAL E MÉTODOS	12
4. RESULTADOS	22
5. DISCUSSÃO	37
6. CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS	43

RESUMO

O uso do Silício nos sistemas de cultivos de cana-de-açúcar tornou-se uma ferramenta para atenuar as condições estressantes, principalmente em condições de falta de água. Entretanto, ainda não se sabe muito sobre o efeito residual do Silício nos ciclos subsequentes da cana-de-açúcar em sistemas fertirrigados com o elemento sob condição de déficit hídrico. Nesse sentido, este estudo tem como objetivo investigar o impacto residual do Silício aplicado via fertirrigação na cana-planta e seus reflexos na brotação da primeira soqueira da cana-de-açúcar sob déficit hídrico. Para isso, foi realizado o experimento na área experimental da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal, São Paulo. O estudo foi realizado em delineamento experimental "split-block" com um fatorial 2 x 2, envolvendo dois níveis de retenção de água no solo (70% e 35% da capacidade de retenção) e duas condições de aplicação de silício (0 mmol e 1,8 mmol) em 5 blocos. Os resultados mostram que o déficit hídrico reduziu a altura das plantas, diâmetro do caule, número de perfilhos, massa seca da parte aérea e produtividade, enquanto a aplicação de silício (Si) aumentou esses parâmetros, tanto sob déficit hídrico (35% da CRA) quanto em condições adequadas (70% da CRA). O Si melhorou a eficiência fotoquímica do fotossistema II (F_v/F_m) e a eficiência da conversão de energia absorvida (F_v/F_0), e reduziu o rendimento máximo de excitação não fotoquímica (F_0/F_m) em ambas as condições hídricas, além disso, melhorou a eficiência de uso dos nutrientes e reduziu o estresse oxidativo. Também, o déficit hídrico diminuiu a concentração de Si na camada superficial do solo e o acúmulo de Si na parte aérea das plantas, enquanto a aplicação de Si aumentou a concentração de Si no solo e na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar. Portanto, tendo em vista tais resultados, podemos notar que os efeitos residuais do silício podem apresentar potencial para reduzir os danos causados pelo déficit hídrico na cultura da cana de açúcar e aumentar a resiliência das plantas, no entanto, devem ser realizados mais estudos sobre o efeito residual do silício para aprofundar o conhecimento sobre o assunto.

Palavras chave: *Saccharum officinarum*; déficit hídrico; nutrição silicatada; efeito residual.

ABSTRACT

The use of silicon in sugarcane cultivation systems has become a tool to mitigate stressful conditions, especially when there is a lack of water. However, not much is known about the residual effect of silicon on subsequent sugarcane cycles in systems fertigated with the element under water deficit conditions. With this in mind, the aim of this study was to investigate the residual impact of Silicon applied via fertigation on the sugarcane plant and its effects on the sprouting of the first ratoon of sugarcane under water deficit conditions. The experiment was carried out in the experimental area of the Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal, São Paulo. The study was carried out in a split-block experimental design with a 2 x 2 factorial, involving two levels of soil water retention (70% and 35% of retention capacity) and two silicon application conditions (0 mmol and 1.8 mmol) in 5 blocks. The results show that water deficit reduced plant height, stem diameter, number of tillers, shoot dry mass and yield, while the application of silicon (Si) increased these parameters, both under water deficit (35% RHC) and under suitable conditions (70% RHC). Si improved the photochemical efficiency of photosystem II (F_v/F_m) and the absorbed energy conversion efficiency (F_v/F_0), and reduced the maximum non-photochemical excitation yield (F_0/F_m) in both water conditions, in addition to improving nutrient use efficiency and reducing oxidative stress. Also, water deficit decreased the concentration of Si in the topsoil and the accumulation of Si in the aerial part of the plants, while the application of Si increased the concentration of Si in the soil and in the aerial part of the sugarcane plants. Therefore, in view of these results, we can see that the residual effects of silicon may have the potential to reduce the damage caused by water deficit in the sugarcane crop and increase plant resilience, however, further studies on the residual effect of silicon should be carried out to deepen knowledge on the subject.

Keywords: *Saccharum officinarum*; water deficit; silicate nutrition; residual effect.

1. INTRODUÇÃO

Os avanços das técnicas de sistema de plantio associados à ampliação da área de irrigação nos canaviais, têm resultado em aumento da produtividade da cultura. Entretanto, o cultivo de cana-de-açúcar sob condições de estresse está cada vez mais recorrente, devido às secas frequentes, ao aumento de temperatura e a outros estresses, resultando em perda de produtividade da cultura da cana-de-açúcar (REICHERT et al., 2020; VERMA et al., 2020).

O déficit hídrico é a condição abiótica estressante mais presente no sistema de produção de cana-de-açúcar, provocando prejuízos no crescimento das plantas, reduzindo a rebrota, o perfilhamento e a vida útil dos canaviais (VERMA et al., 2020). Em condição de déficit hídrico, ocorre o aumento do estresse oxidativo, prejudicando as atividades fisiológicas da planta e a redução da eficiência do uso de nutrientes (TEIXEIRA et al., 2020), como observado em estudos com plantas em condições estressantes, provocando alteração na estequiometria C:N:P (OLIVEIRA et al., 2021).

Neste cenário, aumenta-se a necessidade de novos estudos buscando métodos atenuadores que possam mitigar os estresses bióticos e abióticos, principalmente em condição de déficit hídrico. O silício (Si) surge como possibilidade atenuadora em condições estressantes, capaz de reduzir o estresse oxidativo nas plantas e de minimizar os impactos no equilíbrio homeostático C, N e P (OLIVEIRA et al., 2021; COSTA et al., 2023), incrementando a eficiência de uso dos nutrientes e reduzindo a perda de produtividade das culturas (CAMARGO et al., 2019). Adicionalmente, pesquisas indicam que plantas supridas com o Si podem ter prejuízos biológicos atenuados

em razão de sua capacidade de mitigar estresses diversos, principalmente quando se trata de plantas acumuladoras do elemento benéfico, como a cana-de-açúcar (Camargo, 2021; Teixeira et al., 2022).

Dessa forma, o Si tem apresentado uma alternativa potencial para atenuar as consequências negativas causadas por esses danos induzidos pelo déficit hídrico na cultura da cana-de-açúcar, aumentando a eficiência do uso de água na planta e o potencial de água dos tecidos (BEZERRA et al., 2019; DE CAMARGO et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2020; VERMA et al., 2019). Adicionalmente, o Si é capaz de ativar mecanismos atenuadores de estresse em plantas, como ácido ascórbico, compostos fenólicos e carotenoides (TEIXEIRA et al., 2022). Essas alterações atenuam o estresse oxidativo pela redução do extravasamento de eletrólitos celulares e da degradação da clorofila (CAMARGO et al., 2019; BEZERRA et al., 2019), também melhoram a eficiência quântica do Fotossistema II e modificam o equilíbrio homeostático C, N e P (TEIXEIRA et al., 2020; VERMA et al., 2019).

A ação benéfica do Si pode ser reduzida nas plantas, dependendo do método de aplicação (foliar ou radicular), das fontes (solúvel ou insolúvel), da concentração (polimerização de doses elevadas > 3 mM), da época de aplicação (antes da condição ou depois da condição estressante) e da capacidade de as plantas absorverem silício (acumuladora, intermediária ou não acumuladora) (CAMARGO et al., 2021). Deste modo, as fontes solúveis apresentam maior eficiência em suprir as plantas com silício, potencializando sua resposta em sistemas de fertirrigação, que permitem ampliar a eficiência da aplicação deste elemento benéfico (TEIXEIRA et al., 2022). Este método de aplicação de silício,

via solução nutritiva, garante maior eficiência devido ao maior contato íon-raiz e reduz a perda do Si pela aplicação, que pode ocorrer, principalmente, por lixiviação (VICIEDO et al., 2021; SHUKLA et al., 2018).

Nesse sentido, o uso contínuo de Si em canaviais irrigados pode apresentar efeito residual dos ciclos de cultivo anteriores, abrindo nova linha de pesquisa, principalmente em razão de não se saber se as plantas de cana-de-açúcar absorvem todo o Si fornecido pela fertirrigação ou se parte deste suprimento permanece disponível para a soqueira.

Nessa perspectiva, há pesquisas realizadas com resíduos de Si em restos culturais de cana-de-açúcar, onde foi avaliado Si fitogênico (PhSi), comprovando seu acúmulo nas plantas (MANTER., 2022). Entretanto, não foi realizado estudo que demonstre o efeito residual da fertirrigação do Si em condições hídricas adequadas e, muito menos, em condições de irrigação deficitária.

Nesse cenário, é pertinente realizar um estudo que avalie a ação dos efeitos residuais do Si fornecido para cana-planta em condições fertirrigadas adequada e deficitária, de modo a verificar se ocorre redução significativa dos danos causados pelo déficit hídrico e, conseqüentemente, se isso favorece a taxa de rebrota e o perfilhamento da primeira soqueira. Para isso, faz-se necessário avaliar as hipóteses: (i) que existe efeito residual do silício aplicado na cana-planta em sistemas fertirrigados em condições hídricas adequada e deficitária na soqueira da cultura; (ii) a partir da redução do estresse oxidativo, ativando mecanismos antioxidantes nas plantas, melhorando a eficiência quântica do fotossistema II e a eficiência de uso dos nutrientes e, conseqüentemente, a taxa de rebrota e de perfilhamento da primeira soqueira

da cana-de-açúcar.

Em suma, o objetivo geral deste trabalho foi Investigar o efeito residual do Si aplicado via fertirrigação na cana-planta, com e sem déficit hídrico, e seus reflexos na brotação e na produtividade da primeira soqueira, a partir da avaliação da eficiência de uso de nutrientes, da eficiência quântica do fotossistema II e da taxa de rebrota e de perfilhamento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1- Produção de cana-de-açúcar e condições limitantes de cultivo

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) corresponde a uma espécie de ciclo semiperene que apresenta alta produtividade, em razão do rebrotamento da soqueira (MANHÃES et al., 2015). De acordo com a Companhia Nacional do Abastecimento (CONAB, 2024), o Brasil comanda o comércio de açúcar, a bioenergia e os derivados, assumindo a posição de maior produtor mundial de cana-de-açúcar.

A produção brasileira da cultura, na safra de 2023/2024, demonstrou a redução em sua produção de 3,8% em comparação ao ciclo passado, produzindo 685,86 milhões de toneladas (CONAB, 2024). As pequenas incidências de chuvas, associadas às elevadas temperaturas que foram apontadas na região Centro-Sul, são os principais pontos que estão resultando em redução de produtividade, estipulada em 79.079 kg ha⁻¹, 7,6% a menos que a alcançada na safra anterior, que foi facilitada pelas melhores condições climáticas (CONAB, 2024), apontando que condições severas de cultivo são

aspectos cruciais no rendimento da cultura, principalmente as condições climáticas. Portanto, o déficit hídrico é um aspecto importante e responsável por limitar a produtividade da cultura.

A produção de cana-de-açúcar no Brasil é destinada, principalmente, para a feitura de açúcar e de etanol; contudo, também é bastante usufruída para fabricar outros artigos, como cachaça artesanal, doces e forragens que servem de alimento para animais (PEREIRA et al., 2020).

O plantio da cultura é executado em dois períodos, derivando na cana-planta de ano (12 meses) ou na cana-planta de ano e meio (18 meses); contudo, após a feição do primeiro corte, o ciclo das mesmas se torna-se anual, ganhando a designação de cana-soca (Barbosa, 2010). A fenologia da cana-de-açúcar (primeira e segunda época) é constituída por oito diferentes etapas: i) plantio do tolete; ii) brotação do tolete; iii) começo do perfilhamento; iv) perfilhamento intenso; v) maturação; vi) colmos industrializáveis; vii) corte ou colheita, e viii) brotação da soqueira (SEGATO et al., 2006).

A necessidade anual de água pela cana-de-açúcar gira em torno de 1.500 a 2.500 mm, variando conforme a região, o clima, as variedades e a classe de solo (DOORENBOS; KASSAM, 1994).

O ciclo fenológico da cultura abrange distintas etapas, desde o plantio até à colheita. A acessibilidade hídrica em cada uma dessas etapas é fundamental para o seu desenvolvimento, sendo muito importante o uso de alternativas que possam contornar a falta desse elemento ou atenuar os prejuízos causados, como o uso de irrigação, a fertirrigação e outras tecnologias que vêm sendo desenvolvidas, de modo a assegurar uma produção sustentável e eficaz.

Adicionalmente, a cana-de-açúcar é uma cultura com marcante capacidade fotossintética, um aspecto em comum das plantas que apresentam o metabolismo C4, contribuindo para que a planta tenha maior capacidade de concentrar CO₂, diminuindo, assim, a fotorrespiração, o que gera elevados índices fotossintéticos, principalmente em condições de extrema radiação solar (LUCENA et al., 2020).

No entanto, no decorrer de seu desenvolvimento, em consequência das alterações das condições climáticas, estão tornando-se frequentes períodos em que a cultura é cultivada sob condições de déficit hídrico e outros estresses, resultando em perda de produtividade (REICHERT et al., 2020; VERMA et al., 2020). Nesse contexto, o déficit hídrico corresponde à condição estressante mais frequente no sistema de produção de cana-de-açúcar, ocasionando danos no crescimento das plantas, diminuindo a rebrota, o perfilhamento e a vida útil dos canaviais (VERMA et al., 2020). Em condição de déficit hídrico, acontece o aumento do estresse oxidativo, gerando o aumento do extravasamento de eletrólitos, afetando as atividades fisiológicas da planta, como a fotossíntese e a eficiência do uso de nutrientes (TEIXEIRA et al., 2020), como verificado em estudos com plantas em condições estressantes, impulsionando alteração na estequiometria C:N:P (OLIVEIRA et al., 2021).

2.2- Fertirrigação com Si e seus benefícios na vida das plantas sob estresse hídrico

Diante desse cenário, aumenta-se a demanda por novos estudos, buscando métodos atenuadores que possam reduzir os estresses bióticos e

abióticos, principalmente em condição de déficit hídrico.

Dessa maneira, juntamente com o avanço de sistemas de irrigação e de fertirrigação, o uso do Si aparece como alternativa atenuadora em condições estressantes, capaz de reduzir o estresse oxidativo nas plantas e de mitigar os impactos no equilíbrio homeostático C, N e P (OLIVEIRA et al., 2021; COSTA et al., 2023), aumentando a eficiência de uso dos nutrientes e diminuindo a perda de produtividade das culturas (CAMARGO et al., 2019). Nesse sentido, pesquisas apontam que plantas suplementadas com o Si podem apresentar menores prejuízos biológicos devido ao seu potencial de mitigar estresses distintos, principalmente quando se fala de plantas acumuladoras do elemento benéfico, como a cana-de-açúcar (CAMARGO., 2021; TEIXEIRA et al., 2022).

Dessa maneira, o Si tem-se mostrado um método alternativo relevante para atenuar os impactos causadas por estresses, induzidos majoritariamente pelo déficit hídrico na cultura da cana-de-açúcar, promovendo melhor eficiência do uso de água na planta e o potencial de água dos tecidos (BEZERRA et al., 2019; DE CAMARGO et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2020; VERMA et al., 2020). Ademais, o Si permite potencializar mecanismos atenuadores de estresse em plantas, como ácido ascórbico, compostos fenólicos e carotenoides (TEIXEIRA et al., 2022). Tais alterações mitigam o estresse oxidativo pela redução do extravasamento de eletrólitos celulares e da degradação da clorofila (CAMARGO et al., 2019; BEZERRA et al., 2019); também, resulta em melhorias na eficiência quântica do PS II e altera o equilíbrio homeostático C, N e P (TEIXEIRA et al., 2020; VERMA et al., 2019).

Estudos atuais apontam que o Si pode contribuir na modulação das rotas

metabólicas associadas ao uso eficiente de C, N e P, o que é crucial para a produção sustentável em sistemas de cultivo intensivo (TEIXEIRA et al., 2020). Tais alterações no metabolismo de N, P e C modificam as relações estequiométricas entre os elementos, promovendo nova homeostase nutricional nas plantas, auxiliando na melhor utilização de recursos no ambiente, impulsionando a captação de C, N e P e a adaptação a situações ambientais distintas, como em locais de secas (LIU et al., 2020).

A principal forma como o Si é absorvido pelas plantas corresponde ao ácido monossilícico (H_4SiO_4). O processo de absorção pode ocorrer de duas maneiras: sendo passivo, contribuído pelo fluxo em massa da água em plantas não acumuladoras (Santos et al., 2021), ou pode ser ativo em plantas acumuladoras de Si. Tal atividade é facilitada por transportadores específicos de Si, como Lsi1, que corresponde a um transportador de influxo de Si existente nas plantas, que possibilita a absorção do elemento pelas raízes, em razão de estar fixado na membrana plasmática de células da exoderme e da endoderme das raízes, e o Lsi2, transportador de efluxo, residindo no lado proximal das células da exoderme e da endoderme, desencadeando o transporte desse elemento para o xilema, local este que será direcionado para as partes aéreas da planta (MA et al., 2011).

O deslocamento do Si que acontece dentro da planta corresponde a um processo ativo nas plantas acumuladoras de Si, como plantas de cana-de-açúcar, sendo o elemento é movimentado para distintas partes das plantas a partir do sistema vascular (XU et al., 2023), podendo distinguir as plantas a partir de seus potenciais de absorção pela presença ou pela ausência de

transportadores específicos de Si (Lsi1, Lsi2, Lsi3 e Lsi6) (MA et al., 2015), que contribuem para o seu transporte pelas membranas celulares.

As plantas podem ser agrupadas em três grupos em relação ao potencial de absorção e da concentração de Si em seus tecidos: acumuladoras ($> 10 \text{ g kg}^{-1}$ de Si), intermediárias ($5 \text{ a } 10 \text{ g kg}^{-1}$ de Si) e não acumuladoras (menos de 5 g kg^{-1} de Si) (MA et al., 2011). Para as gramíneas, como a cana-de-açúcar, a quantidade de Si nos tecidos pode ser de 10 a 20 vezes maior do que nas eudicotiledôneas (MA et al., 2011).

Depois de sua absorção, o Si é levado pelo xilema e armazenado especialmente nas paredes celulares, na condição de sílica amorfa hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), promovendo maior firmeza dos tecidos, principalmente em partes de maior perda de água, como nas folhas (KORNDÖRFER; SOUZA, 2018). Consequentemente, tal acúmulo de Si nas paredes celulares dos órgãos de transpiração constitui dupla camada de sílica-cutícula, diminuindo o processo de transpiração pelas plantas (Santos et al., 2021). A criação desta camada protetora auxilia, também, para melhor resistência mecânica das células, fazendo as plantas mais tolerantes ao ataque de pragas e de doenças (LANNA et al., 2021).

Contudo, a eficácia do uso do Si nas plantas vai depender do método de aplicação (foliar ou radicular), das fontes (solúvel ou insolúvel), da concentração (polimerização de doses elevadas $> 3 \text{ mM}$), da época de aplicação (antes da condição ou depois da condição estressante) e da capacidade de as plantas absorverem Si (acumuladora, intermediária ou não acumuladora) (CAMARGO et al., 2021). Com isso, as fontes solúveis possuem melhor eficiência na

suplementação com silício, impulsionando seu resultado em sistemas de fertirrigação, que permite aumentar a eficácia da aplicação deste elemento benéfico (TEIXEIRA et al., 2022). Também, vale destacar que o método de aplicação de Si, a partir da solução nutritiva, assegura maior eficiência em razão de maior contato íon-raiz, reduzindo a perda do Si quando se comparam outras formas de aplicação (VICIEDO et al., 2021; SHUKLA et al., 2018).

Ademais, o Si reduz distintos estresses por ativar sistemas enzimáticos e não enzimáticos que neutralizam o efeito maléfico do excesso da EROs (KIM et al., 2017). O metabolismo das plantas resulta a EROs como primeira resposta à maior parte dos estresses abióticos. Esta resposta é conhecida por gerar danos severos à estrutura celular e a organelas, e por modificar a função celular normal. Dessa maneira, o elemento benéfico impulsiona sistemas antioxidativos, partindo da elevação da taxa de compostos fenólicos e de ácido ascórbico (SOUZA et al., 2018), e cresce a atividade das enzimas superóxido dismutase, peroxidase, catalase e glutathione redutase, diminuindo a peroxidação lipídica em plantas sob estresse (LIANG et al., 2003).

Portanto, o Si gera melhorias significativas no sistema antioxidante das plantas, em consequência do aumento da quantidade de enzimas que diminuem o estresse oxidativo, e o extravasamento de eletrólitos celulares (peroxidação lipídica) (ZHOU et al., 2017), além de elevar a taxa de compostos de defesa não enzimáticos como carotenoides, ácido ascórbico (AsA) e compostos fenólicos (SOUZA et al., 2019). Tais mecanismos de defesa inibem de forma direta as ações deletérias de ERO's, pois durante o processo de redução de ascorbato peroxidase (APX) são usufruídas duas moléculas de ASA como doadoras de

elétrons para reduzir H_2O_2 em H_2O e O_2 , diminuindo a permeabilidade da membrana, assegurando sua integridade e sua estabilidade (ZHU et al., 2004).

2.3- Efeito residual do Si nos sistemas de cultivo de cana-de-açúcar

O uso constante de Si em canaviais, a partir da fertirrigação, pode demonstrar efeito residual dos ciclos de cultivo anteriores, criando um questionamento na linha de pesquisa sobre o elemento, especialmente devido a não se ter conhecimento suficiente para saber se as plantas de cana-de-açúcar absorvem todo o Si aplicado pela fertirrigação, ou se parte deste suprimento ainda permanece disponível para a soqueira.

Nesse contexto, existem pouquíssimas pesquisas realizadas com resíduos de Si na cana-de-açúcar. Uma das poucas pesquisas encontradas realizou estudos com restos culturais de cana-de-açúcar, onde foi avaliado o Si fitogênico (PhSi) acumulado nos solos durante a decomposição das plantas, sendo uma importante fonte de Si para plantas em ecossistemas naturais e agrícolas, indicando que, na cana-de-açúcar, o acúmulo de PhSi a partir de resíduos culturais pode fornecer uma fonte sustentável de Si para a absorção da cultura (MANTER., 2022). Entretanto, ainda não se têm relatos de estudos realizados que demonstrem o efeito residual da fertirrigação do Si em situações hídricas adequadas e, muito menos, em condições de irrigação deficitária.

Portanto, é fundamental a execução de estudos que avaliem o funcionamento dos efeitos residuais do silício fornecido para cana-planta, a partir de fertirrigação, em condição adequada e deficitária, de forma a registrar se acontece uma diminuição significativa dos danos ocasionados pelo déficit hídrico

e, conseqüentemente, se isso contribui para o índice de rebrota e de perfilhamento da primeira soqueira.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Condições experimentais

O estudo foi realizado em condições de campo, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), em Jaboticabal, São Paulo (-22° 43' 30" de latitude e 47° 38' 00" de longitude e altitude de 546 metros). O clima predominante na região é classificado como Aw tropical (clima tropical com estação seca), caracterizado pela média anual de precipitação de 1.425 mm e temperatura média de 21,7 °C. O plantio da cana-planta foi em 10-09-22, teve a brotação plena após o corte em 01-10-23, dando início a essa pesquisa para avaliar o efeito residual do Si na soqueira da cana-de-açúcar.

O solo da área experimental foi classificado como um Latossolo Vermelho Eutrófico de textura muito argilosa nas camadas de 0-20cm e 20-40cm. Para a execução das análises químicas e Granulométricas, foram coletadas amostras de solo em duas profundidades distintas: 0 – 20 cm e 20 – 40cm, envolvendo a área total. As amostras de solo foram submetidas a análises químicas, seguindo os procedimentos detalhados por (RAIJ et al., 2001), enquanto as análises granulométricas foram realizadas de acordo com as diretrizes apresentadas no manual de métodos de análise de solo da Embrapa (DONAGEMA et al., 2011). Os resultados dos atributos do solo para camada de 0-20 e 20-40cm de profundidade foram os seguintes: pH=6,1 e 6,5; M.O.=22 e 17 g dm³; P= 57 e 31

mg dm³; S= 6 e 7 mg dm³; C= 39 e 36 mmol_c dm⁻³; Mg = 16 e 15 mmol_c dm⁻³; K = 3,7 e 3,6 mmol_c dm⁻³; Al = 0 e 0 mmol_c dm⁻³; H + Al = 21 e 18 mmol_c dm⁻³; Si = 10 e 9 mg kg⁻¹; Argila = 603 g kg⁻¹ e 607; Silte = 250 e 257 g kg⁻¹; Areia = 147 e 136 g kg⁻¹.

3.2 Condução e manejo do cultivo da cana-planta

A área experimental possui um histórico de cultivo de grãos, e o processo de preparação do solo foi realizado em sistema convencional a partir de duas gradagens pesadas e posteriormente sulcagem a uma profundidade de 40 cm para o plantio da cana-planta.

O experimento da cana-de-açúcar foi implantado em parcelas do tipo "Slip-block", sendo os tratamentos definidos com base na capacidade de retenção de água do solo (CRA), com dois níveis de CRA: 70% (grupo controle, sem restrição hídrica) e 35% (com restrição hídrica) e duas condições de aplicação de silício (Si): ausência de Si (0 mmol) e presença de Si (1,8 mmol) em 5 blocos. O plantio ocorreu a partir do transplante de mudas de cana-de-açúcar pré-brotadas (MPB) (*Saccharum officinarum* spp.), cultivar RB 962869 a 1,5 m entre linhas e as parcelas com três linhas. Os blocos foram separados por um espaçamento de 2 metros ao longo da linha de gotejamento subterrâneo.

Diante dos resultados da análise química, realizou-se a adubação de plantio conforme indicações de (RAIJ et al., 1997), a partir da aplicação de 67 kg ha⁻¹ de ureia (contendo 45% de N), 134 kg ha⁻¹ de KCl (com 60% de K₂O) e 244 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo (com 41% de P₂O₅). Após 15 dias do transplante realizou-se a fertirrigação utilizando uma solução contendo 10 kg ha⁻¹ de zinco, na forma de sulfato de zinco, juntamente com 2 kg ha⁻¹ de boro na forma de

ácido bórico. Posteriormente, aos 90 DAT, realizou-se a aplicação de 100 kg ha⁻¹ de ureia e 67 kg ha⁻¹ de KCl via fertirrigação.

A aplicação de Si foi conduzida por meio de fertirrigação, realizada em cinco momentos distintos durante o período de cultivo. As duas primeiras aplicações ocorreram durante a fase de perfilhamento das plantas, nos dias 35 e 122 dias após o transplântio (DAT), enquanto as três últimas foram realizadas durante a fase de crescimento dos colmos, nos dias 141, 164 e 128 DAT, utilizando a concentração de 1,8 mmol L⁻¹ em todas as aplicações. As fertirrigações foram realizadas com uma solução de 0,51 L ha⁻¹ de Si, junto com uma lâmina de água de 1,5 mm. A fonte do Si foi o silicato de sódio neutro (SNaN) proveniente da Diatom Mineração®, apresentando composição de 8,9% de N₂O e 28% de SiO₂, com densidade de 1,4 g L⁻¹. O valor pH da solução contendo Si foi controlado no intervalo entre 5,5 e 6,5, com ajustes realizados a partir da adição de solução de NaOH (1 mmol) e HCl (1 mmol) até atingir a faixa desejada.

O sistema de gotejamento subsuperficial utilizado contém emissores do modelo Topdrip 15 mil, espaçados a cada 0,5 metros, com vazão de 1 L m⁻¹ h⁻¹ e pressão de serviço de 1,20 kPa. Os tubos gotejadores foram posicionados a uma profundidade de 0,30 metros abaixo da linha de plantio das mudas (MPB). O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), calculado em 93,23%, foi obtido a partir da análise das vazões dos emissores, seguindo a metodologia proposta por (KELLER E KARMELI., 1975). Esse valor calculado é considerado como excelente para o sistema de gotejamento, conforme apontado por (BERNARDO et al., 2019).

A água utilizada no sistema de irrigação é proveniente de fontes subterrâneas, e antes de entrar no sistema, passa por um processo de filtragem a partir de discos com malha de 125 mesh. Essa água filtrada é armazenada em um reservatório com capacidade útil de 17,5 metros cúbicos, localizado a uma distância de 120 metros do local do experimento. A operação do sistema de irrigação é realizada por uma motobomba centrífuga de 1 cv, que está conectada a um manômetro e a um sistema de injeção de fertilizantes por sucção direta.

3.3 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado no estudo foi semelhante do ciclo de cultivo anterior em parcelas do tipo "Slip-block", em fatorial 2 x 2, sendo dois níveis de retenção de água no solo (CRA): (70% - sem restrição hídrica e 35% - com restrição hídrica) e duas condições de aplicação de Silício (0 mmol e 1,8 mmol) em cinco blocos. Para condução do estudo, após o corte do primeiro ciclo de cultivo (cana-planta), foi realizado a irrigação diária de reposição de água do solo para manter a capacidade de retenção de água no solo em regimes de 70% e 35%, buscando avaliar o efeito do déficit-hídrico provocado no ciclo da cana-planta na brotação da primeira soqueira.

3.4 Variáveis experimentais do estudo

Para avaliações do experimento, foram consideradas como parcela útil, as plantas da linha central de cada parcela experimental, excluindo as duas linhas de cada extremidade.

As avaliações experimentais começaram a ser avaliadas a partir de vinte dias após a emergência do broto da primeira soqueira 20-10-23 para avaliar os

efeitos residuais do Si referente ao número de perfilho, ao diâmetro e altura das plantas, à eficiência quântica do fotossistema II, à massa seca, à determinação dos teores de C, N, P e Si, à determinações da estequiometria elementar (C,N,P) estabelecendo as razões de C:N, C:P, C:Si, N:P, N:Si e P:Si, ao teor de Si disponível no solo, ao conteúdo de clorofila, de carotenoides de feofitinas e ao extravasamento de eletrólitos celulares, de açúcares, de ácido ascórbico e fenóis. Por fim, no dia 01/08/24 foi realizada a colheita para determinar a produtividade e o número de entrenós no colmo. Os procedimentos e métodos utilizados foram descritos abaixo.

3.4.1. Número de perfilho, diâmetro e altura das plantas

Foi mensurado o número de perfilho em todas as touceiras da parcela útil por contagem simples. O diâmetro do colmo e altura das plantas também foram mensurados em todas as plantas das touceiras da parcela útil com auxílio de paquímetro digital para o diâmetro e de régua graduada para a altura.

3.4.2. Extravasamento de eletrólitos celulares

A avaliação da integridade das membranas celulares das folhas foi realizada a partir do extravasamento de eletrólitos. Para isso, cinco discos foliares da folha diagnose da planta de cana-de-açúcar foram coletados e colocados em um becker de 100 mL contendo 20 mL de água deionizada. Após um repouso de duas horas, a condutividade elétrica do extrato foi medida. Em seguida, os discos foliares foram submetidos a um tratamento térmico em uma autoclave a 120 °C por 20 minutos, a fim de romper as membranas celulares e permitir a liberação dos eletrólitos para o meio externo. Após o tratamento

térmico, uma nova leitura da condutividade elétrica foi realizada no líquido resultante. O extravasamento de eletrólitos foi calculado como a razão entre a condutividade inicial e a condutividade final, sendo posteriormente multiplicado por 100 (DIONISIO-SESE E TOBITA., 1998).

3.4.3. Conteúdo de clorofila, de carotenoides e feofitinas

Foram coletados cinco discos foliares, cada um com uma área de 26,4 mm² do terço médio da lâmina foliar da folha diagnose. Esses discos foram pesados imediatamente para determinação da massa fresca. As amostras foram então submetidas ao processo de despigmentação utilizando acetona a 80%. As leituras das amostras foram conduzidas por um espectrofotômetro (modelo DU640, Beckman, EUA) em diferentes comprimentos de onda: 663 nm para clorofila a (Chla), 647 nm para clorofila b (Chlb), 470 nm para carotenoides, 665 nm para feofitina a e 653 nm para feofitina b; de acordo com o método proposto por (LICHTENTHALER., 1987). Os resultados obtidos foram expressos em miligramas por grama (mg g⁻¹) de massa fresca.

3.4.4. Eficiência quântica do fotossistema II

As folhas das plantas foram conduzidas a um período de adaptação de 30 minutos ao escuro para avaliação da eficiência quântica do fotossistema II. Para isso, foram medidos três parâmetros específicos: eficiência fotoquímica do fotossistema II (Fv/Fm), eficiência da conversão de energia absorvida (Fv/F0) e rendimento máximo de excitação não fotoquímica (F0/Fm). Essas avaliações foram realizadas na folha +1 das plantas da cana-de-açúcar, utilizando um

Fluorômetro Portátil de Excitação Contínua (modelo OS30P+, OPTI-SCIENCES).

3.4.5. Conteúdo de ácido ascórbico

Para a quantificação de ácido ascórbico em amostras vegetais foi realizada a coleta de 1 g de tecido foliar plenamente desenvolvido. Depois, foi realizada a extração a partir da maceração em almofariz com nitrogênio líquido N₂ e, em seguida, foi adicionado 5 mL de ácido oxálico (0,5%) gelado para homogeneização. Após a homogeneização, foi adicionado mais 5 mL de ácido oxálico (0,5 %) gelado e, por fim, foi filtrado em béquero. A quantificação foi realizada em triplicada, sendo retirado 1 mL do extrato filtrado e adicionado 4 mL de ácido oxálico (0,5 %) gelado, posteriormente, foi titulado com 2,6-diclorofenol-indofenol (0,02%) (STROHECKER et al., 1965). Os conteúdos de ácido ascórbicos nas folhas da cana-de-açúcar foram calculados em proporções com base na titulação do padrão da solução de tillman 0,02% com ácido ascórbico e expressos em mg kg⁻¹ por 100 g de massa fresca.

3.4.6. Conteúdo de compostos fenólicos

Foi executada a extração dos compostos fenólicos totais utilizando amostras de folhas frescas, as quais foram imersas em metanol concentrado e mantidas em ambiente escuro durante um período de 3 horas. A quantificação dos fenóis foi realizada a partir de uma reação colorimétrica, empregando o método de folin-ciocalteau 2 N e carbonato de sódio 20%. As leituras foram obtidas utilizando um espectrofotômetro (modelo B442, Micronal, BR) na

absorvência de 765 nm, conforme o procedimento estabelecido por (SINGLETON E ROSSI., 1965).

3.4.7. Determinação de Si disponível no solo

Foi realizada a coleta de solo nas camadas de 0-20 e 20-40 na zona úmida fertirrigada próximo as plantas (15 subamostras por parcela) e as amostras foram devidamente preparadas para análise química para fins de fertilidade do solo, conforme indicado por (RAIJ et al., 2001). O teor de Si disponível no solo foi determinado usando cloreto de cálcio a 0,01 mol como extrator, segundo método de (KORNDÖRFER et al., 2004).

3.4.8. Produção de massa seca

Foram coletadas duas plantas de cada touceira de cana-de-açúcar em aos vinte dias após a brotação e também, a folha diagnóstica na época de pleno desenvolvimento da planta conforme indicado anteriormente. O processo de descontaminação destas amostras foi realizado na seguinte sequência: lavadas em água corrente, solução detergente (0,1% v/v), solução de HCl (0,3% v/v) e posteriormente em água deionizada. Em seguida, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, BR) ($65 \pm 5^\circ\text{C}$) até atingir uma massa constante, sendo obtida a massa seca.

3.4.9. Produtividade da cultura

No momento da colheita da primeira soqueira da cana-de-açúcar, foi contado o número de entrenós por colmo, a partir da média de três colmos por touceira. Para mensurar o rendimento, as plantas foram cortadas a 10 cm do solo, sendo colhidos 2,6 metros de cultivo de cana-de-açúcar (equivalente à área ocupada por 4 plantas do centro da parcela) de cada unidade experimental.

Esses seguimentos foram pesados usando uma balança digital, a fim de estimar a produtividade em toneladas por hectare.

3.4.10. Concentração e acúmulo do Carbono, do Nitrogênio, do Fósforo e do Silício

As amostras das folhas diagnósticas foram moídas com auxílio de moinho de faca do tipo Willey. Posteriormente, foi realizada a digestão do material vegetal da parte aérea para determinação de C pelo método de oxidação por dicromato de K em meio ácido e por titulação de Cr^{3+} em excesso (TADESCO et al., 1995). Para determinação de N, foi realizado pelo método Kjeldahl de oxidação úmida e, para determinação de P, utilizou o método de digestão nítrico-perclórica e colorimetria (método metavanadato de amônio) (BATAGLIA et al., 1983). E para a determinação de Si, foi utilizado o método de digestão alcalina e a leitura por colorimetria com molibdato de amônio (KORNDORFER et al., 2004). Por fim, foi calculado o acúmulo de Si, de C, de N e de P pelo produto da concentração e massa seca, obtendo o acúmulo do elemento em mg por planta.

3.4.11. Razões estequiométricas e eficiência de uso dos nutrientes

As razões estequiométricas foram estimadas a partir das razões das concentrações nas folhas diagnósticas da cana-de-açúcar, estabelecendo as razões de C:N, C:P, C:Si, N:P, N:Si e P:Si. Para a determinação da eficiência de uso dos nutrientes (C, N e P), foram calculados a partir da razão do quadrado da massa seca e conteúdo de nutriente (SIDDIQI AND GLASS., 1981).

3.5 Análise de dados

3.5.1. Teste de outliers

Os dados foram avaliados quanto à presença de valores outliers utilizando o método baseado nos quartis. Inicialmente, o conjunto de dados foi ordenado para determinar os valores dos quartis. O primeiro quartil (Q1) foi definido como o valor abaixo do qual se situam 25% das observações, enquanto o terceiro quartil (Q3) representou o ponto abaixo do qual estão 75% dos dados. O segundo quartil (Q2), por sua vez, correspondeu ao valor mediano da distribuição. Para identificação de outliers, adotou-se o critério de que observações inferiores a $Q1 - 1,5 * IIQ$ ou superiores a $Q3 + 1,5 * IIQ$ seriam consideradas outliers. Nesse contexto, o intervalo interquartílico (IIQ), calculado como a diferença entre Q3 e Q1, foi utilizado como referência para estabelecer um limiar de variação aceitável. Observações localizadas fora desse intervalo, em uma distância 1,5 vezes superior ao IIQ, foram classificadas como discrepantes, evidenciando sua posição anômala em relação à distribuição central dos dados.

3.5.2 Testes de Normalidade e Homogeneidade

Os dados foram submetidos aos testes de preposição de normalidade de Shapiro-Wilk ($p > 0.05$) (ROYSTON., 1995) e homogeneidade de Levene ($p > 0.05$) (GASTWIRTH et al., 2009) com auxílio da linguagem de programação Python (versão 3.9.7; Python Software Foundation).

3.5.3 Análise de variância e teste de média

Os dados foram submetidos a análise de variância e, quando significativo, foram submetidos ao teste de média de Tukey ($p < 0.05$) com auxílio da linguagem de programação Python (versão 3.9.7; Python Software Foundation).

3.5.4 Análise de componentes principais e agrupamento hierárquico

Com o objetivo de explorar as inter-relações entre as variáveis do estudo de forma detalhada, foi empregada a técnica de Análise de Componentes Principais (PCA). Essa metodologia possibilita a identificação dos componentes principais que capturam a variabilidade dos dados e revelam suas dimensões latentes. Para a execução da PCA, utilizou-se a matriz de covariância como base para os cálculos, permitindo extrair informações relevantes sobre as correlações e dependências entre as variáveis.

Paralelamente, foi conduzida uma análise de agrupamento hierárquico com o intuito de identificar padrões de similaridade e estruturas subjacentes nos dados. Nesse processo, adotou-se a distância euclidiana como métrica para medir a proximidade entre os pontos, facilitando a detecção de grupos ou clusters. Para a construção da hierarquia entre os grupos, aplicou-se o método de ligação simples, que conecta os elementos com base na menor distância existente entre eles. Essa abordagem permitiu organizar os dados de forma hierárquica, evidenciando relações de proximidade e agrupamentos significativos no conjunto estudado.

4. RESULTADOS

4.1 Modificações nas concentrações de silício disponível no solo

e nas plantas

O déficit hídrico, na ausência do Si, diminuiu a concentração de Si na camada de superficial do solo (0,0 – 0,2 m) e o acúmulo de Si na parte aérea das plantas, entretanto, não influenciou a concentração de Si na camada subsuperficial (0,2 – 0,4 m) e a concentração de Si na parte aérea das plantas. Adicionalmente, a aplicação de Si indicou o aumento da concentração de Si no solo na camada de superficial (0,0 – 0,2 m) e na subsuperficial (0,2 – 0,4 m), na concentração e no acúmulo de Si na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar nos dois regimes hídricos (Figura 1).

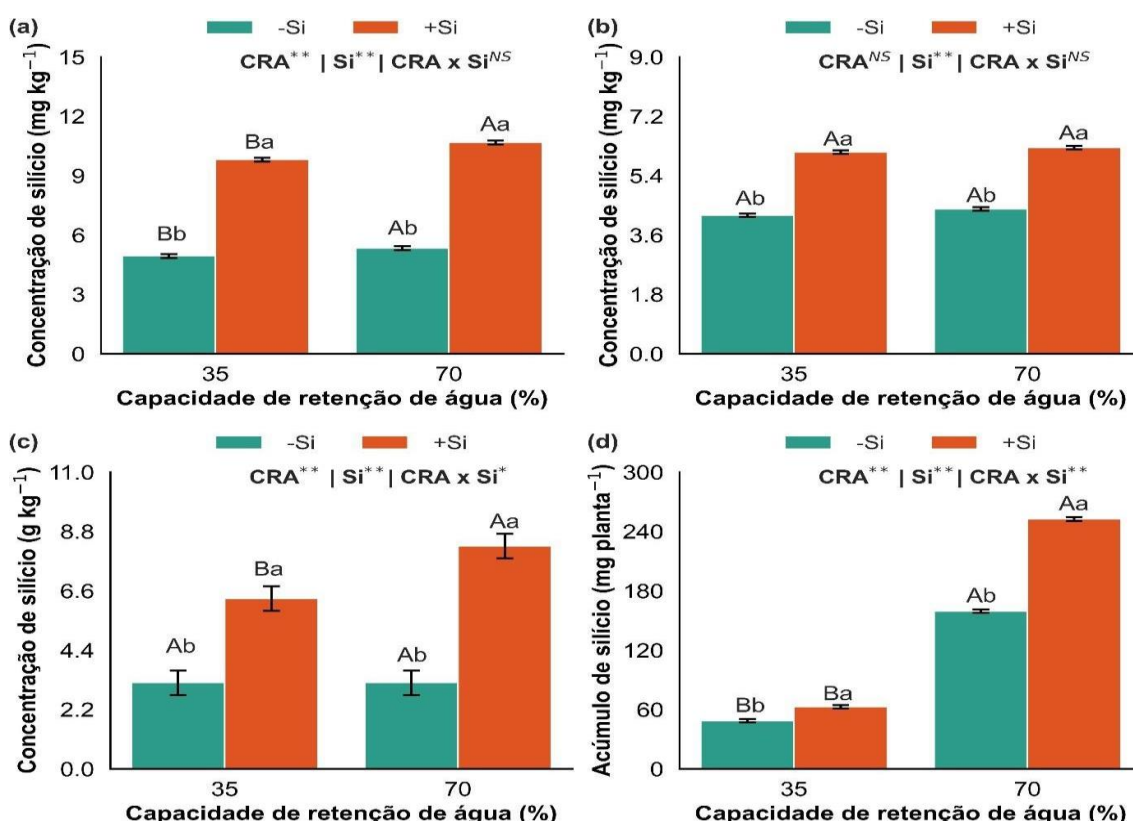


Figura 1. Concentrações de silício disponíveis no solo nas camadas de 0-20 cm (a), e nas camadas de 20-40 cm (b), concentração de silício na parte aérea (c) e acúmulo de Si na parte aérea (d) após vinte dias da emergência da primeira soqueira de cana-de-açúcar cultivada em condições de déficit hídrico (35% da CRA) e regime hídrico adequado (70% da CRA) combinado com a ausência (0 mM) e presença (1.8 mM) da fertirrigação com silício (ausência e presença). As letras maiúsculas diferentes diferem entre a capacidade de retenção de água no solo e as letras minúsculas diferentes diferem entre o suprimento do Si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

4.2 - Teores nutricionais de C, N e P na parte aérea

O déficit-hídrico, na ausência do Si, aumentou o teor de P na parte aérea das plantas, porém manteve o teor de N e C. Adicionalmente, a aplicação de Si indicou o aumento do teor de P, redução do teor de C e não apresentou diferença no teor de N no regime de 35% da CRA. No regime de 70% da CRA, a adição de Si diminuiu o teor de C e manteve os teores de N e de P (Figura 2).

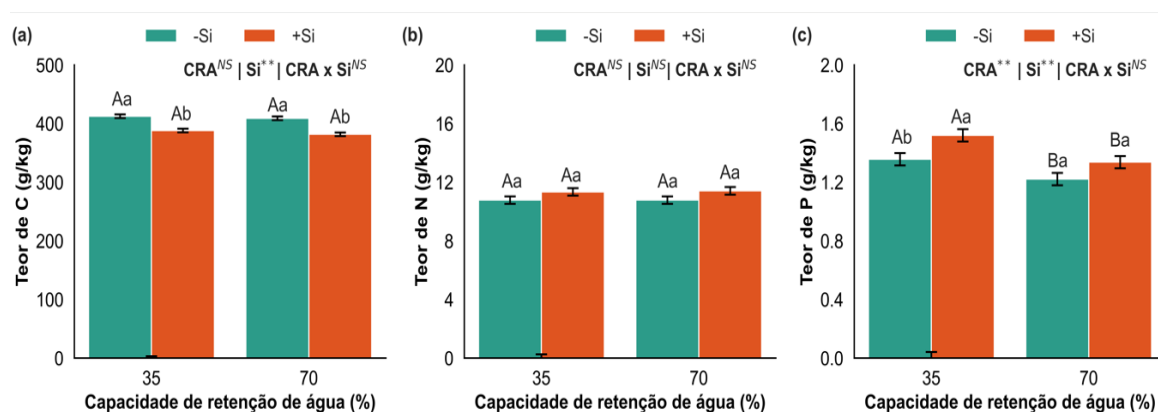


Figura 2. Teor de C (a), Teor de N (b) Teor de P (c) na parte aérea de plantas de cana-de-açúcar cultivada em duas capacidades de retenção de água no solo (35 e 70%) e suprimento de silício (ausência e presença) durante o desenvolvimento da primeira soqueira de cana-de-açúcar cultivada em condições de déficit hídrico (35% da CRA) e regime hídrico adequado (70% da CRA) combinado com a ausência (0 mM) e presença (1.8 mM) da fertirrigação com silício (ausência e presença). As letras maiúsculas diferentes diferem entre a capacidade de retenção de água no solo e as letras minúsculas diferentes diferem entre o suprimento do Si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

4.3– Razões estequiométricas e eficiência de uso de nutrientes

O déficit-hídrico, na ausência do Si, reduziu as razões C:P, porém não teve resultados significativos em C:N, C:SI e N:P. Adicionalmente, nos dois regimes hídricos (35% e 70% da CRA) a aplicação de silício indicou redução em C:N, C:P, C:SI, além disso, não apresentou diferença significativa em N:P (Figura 3).

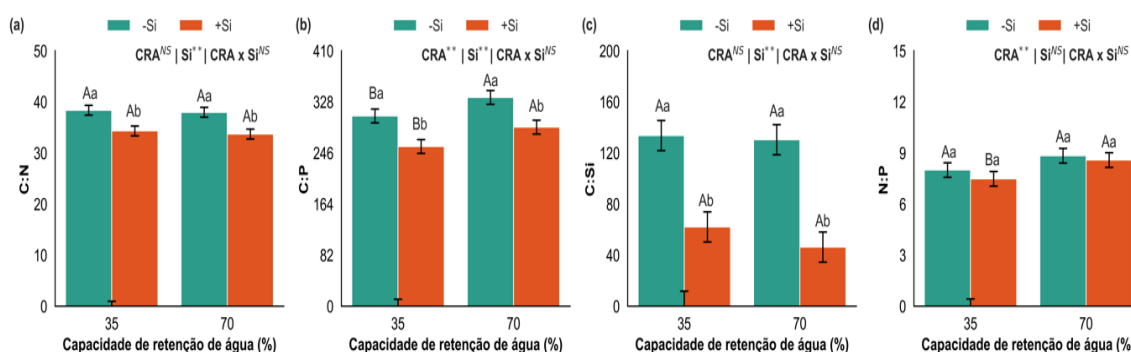


Figura 3. Relação C:N (a), Relação C:P (b) Relação C:Si (c) Relação N:P (d) na folha diagnose de plantas de cana- de-açúcar cultivadas em duas capacidades de retenção de água no solo (35 e 70%) e suprimento de silício (ausência e presença) após a emergência da primeira soqueira de cana- de-açúcar cultivada em condições de déficit hídrico (35% da CRA) e regime hídrico adequado (70% da CRA) combinado com a ausência (0 mM) e presença (1.8 mM) da fertirrigação com silício (ausência e presença). As letras maiúsculas diferentes diferem entre a capacidade de retenção de água no solo e as letras minúsculas diferentes diferem entre o suprimento do Si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

4.4 - Acúmulo do carbono, do nitrogênio e do fósforo

O déficit-hídrico, na ausência do Si, reduziu o acúmulo de C, N e P. Adicionalmente, a aplicação de silício indicou o aumento do acúmulo de N e P, contudo, não apresentou diferença no acúmulo de C dentro do regime de 35% da CRA. Além disso, no regime de 70% da CRA, a adição de Silício incrementou o acúmulo de C, N e P (Figura 4).

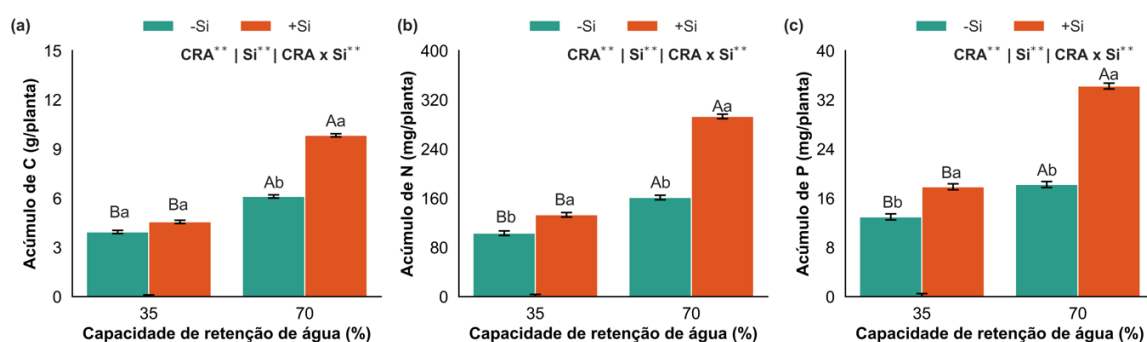


Figura 4. Acúmulo de C (a), Acúmulo de N (b) Acúmulo de P (c) em plantas de cana- de-açúcar cultivadas em duas capacidades de retenção de água no solo (35 e 70%) e suprimento de silício (ausência e presença) após a emergência da primeira soqueira de cana- de-açúcar cultivada em condições de déficit hídrico (35% da CRA) e regime hídrico adequado (70% da CRA) combinado com a ausência (0 mM) e presença (1.8 mM) da fertirrigação com silício (ausência e presença). As letras maiúsculas diferentes diferem entre a capacidade de retenção de água no solo e as letras minúsculas diferentes diferem entre o suprimento do Si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

5.5. Extravasamento de eletrólitos celulares, Ácido Ascórbico e Compostos fenólicos

O déficit hídrico, na ausência do Si, reduziu os compostos fenólicos, aumentou o extravasamento de eletrólitos e não apresentou resultados significativos no ácido ascórbico. Adicionalmente, a aplicação de silício indicou aumento no ácido ascórbico e compostos fenólicos, contudo uma redução no extravasamento de eletrólitos no regime de 35% da CRA. Além disso, no regime de 70% da CRA, a adição de silício incrementou o ácido ascórbico e compostos fenólicos, porém não apresentou resultados significativos no extravasamento de eletrólitos (Figura 5).

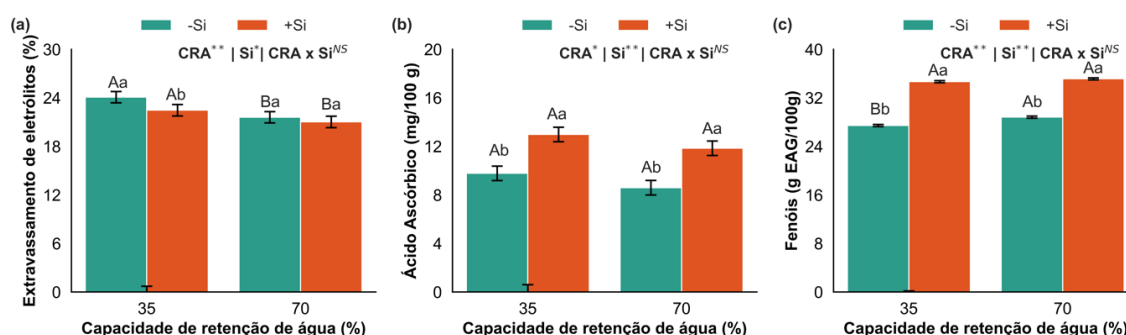


Figura 5. Extravassamento de eletrólitos (a), Ácido ascórbico (b) Fenóis (c) em plantas de cana-de-açúcar cultivadas em duas capacidades de retenção de água no solo (35 e 70%) e suprimento de silício (ausência e presença) após a emergência da primeira soqueira de cana-de-açúcar cultivada em condições de déficit hídrico (35% da CRA) e regime hídrico adequado (70% da CRA) combinado com a ausência (0 mM) e presença (1.8 mM) da fertirrigação com silício (ausência e presença). As letras maiúsculas diferentes diferem entre a capacidade de retenção de água no solo e as letras minúsculas diferentes diferem entre o suprimento do Si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

4.6. Pigmentos fotossintéticos

O déficit-hídrico, na ausência de silício, diminuiu a clorofila *a*, a clorofila *b*, a razão de clorofila *a*/feofitina *a* e a razão de clorofila *b*/feofitina *b* no regime de 35% da CRA, enquanto aumentou a feofitina *a* e a feofitina *b*. A aplicação de silício aumentou no regime de 35% da CRA a clorofila *a*, a clorofila *b*, a razão de

clorofila *a*/feofitina *a* e a razão de clorofila *b*/feofitina *b*, enquanto diminuiu a feofitina *a* e a feofitina *b*. No regime de 70% da CRA, a aplicação de Silício incrementou na clorofila *a*, a clorofila *b*, a razão de clorofila *a*/feofitina *a* e a razão de clorofila *b*/feofitina *b*, enquanto reduziu a feofitina *a* e feofitina *b* (Figura 6).

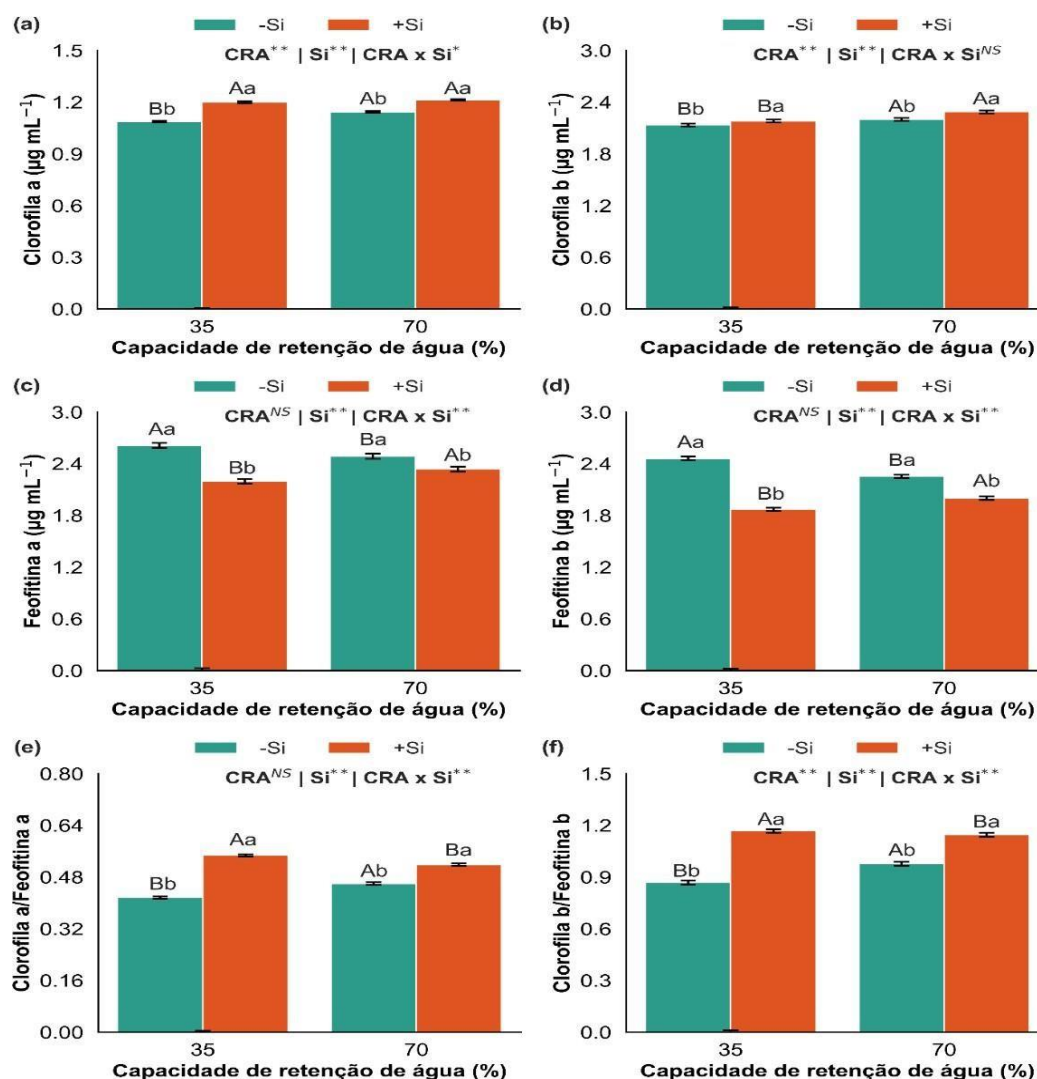


Figura 6. Clorofila *a* (a), Clorofila *b* (b), feofitina *a* (c), feofitina *b* (d), razão de clorofila *a*/feofitina *a* (e) e razão de clorofila *b*/feofitina *b* (f) de plantas de cana-de-açúcar cultivada em duas capacidades de retenção de água no solo (35 e 70%) e suprimento de silício (ausência e presença) após a emergência da primeira soqueira de cana-de-açúcar cultivada em condições de déficit hídrico (35% da CRA) e regime hídrico adequado (70% da CRA) combinado com a ausência (0 mM) e presença (1.8 mM) da fertirrigação com silício (ausência e presença). As letras maiúsculas diferentes diferem entre a capacidade de retenção de água no solo e as letras minúsculas diferentes diferem entre o suprimento do Si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

4.7. Eficiência fotoquímica do Fotossistema II (F_v/F_m), Eficiência da Conversão de Energia Absorvida (F_v/F_0) e Rendimento máximo de excitação não fotoquímica (F_0/F_m)

O déficit-hídrico, na ausência do Si, não modificou a eficiência fotoquímica do fotossistema II, a eficiência da conversão de energia absorvida e o rendimento máximo de excitação não fotoquímica (Figura 3). Por outro lado, a aplicação de Silício aumentou a eficiência fotoquímica do fotossistema II, a eficiência da conversão de energia absorvida em condições de déficit hídrico e sem déficit-hídrico (Figura 3). Enquanto o rendimento máximo de excitação não fotoquímica diminuiu com a aplicação do Si nas duas condições hídricas (35 e 70%) (Figura 7).

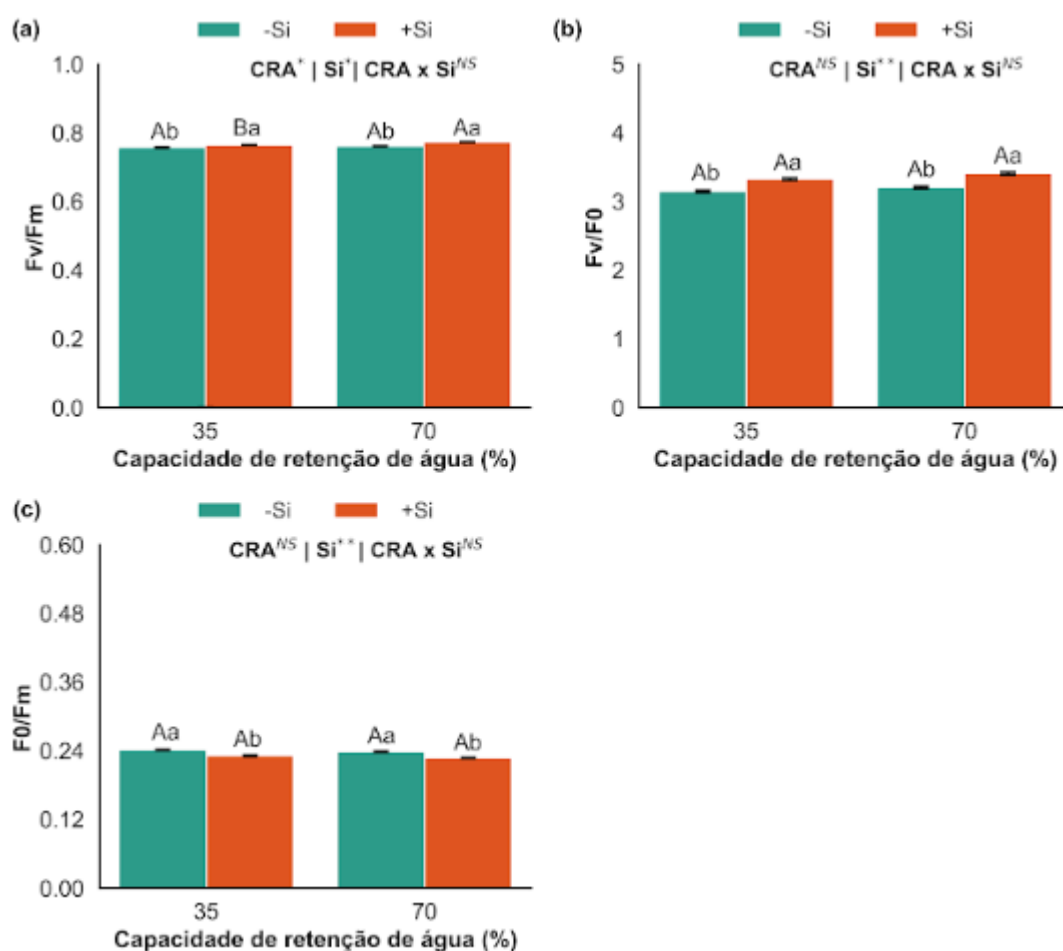


Figura 7. Eficiência Fotoquímica do Fotossistema II (Fv/Fm) (a), Eficiência da Conversão de Energia Absorvida (Fv/F0) (b) Rendimento máximo de excitação não fotoquímica (F0/Fm) (c) de plantas de cana-de-açúcar cultivada em duas capacidades de retenção de água no solo (35 e 70%) e suprimento de silício (ausência e presença) após emergência da primeira soqueira de cana-de-açúcar cultivada em condições de déficit hídrico (35% da CRA) e regime hídrico adequado (70% da CRA) combinado com a ausência (0 mM) e presença (1.8 mM) da fertirrigação com silício (ausência e presença). As letras maiúsculas diferentes diferem entre a capacidade de retenção de água no solo e as letras minúsculas diferentes diferem entre o suprimento do Si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

4.8. Eficiência de uso dos nutrientes

O déficit-hídrico, na ausência do Si, reduziu a eficiência de uso do C, N e P. Adicionalmente, a aplicação de silício indicou o aumento apenas na EUC, contudo, não apresentou diferença em EUN e em EUP no regime de 35% da CRA. Além disso, no regime de 70% da CRA, a adição de Silício incrementou a eficiência de uso do C, N e P (Figura 8).

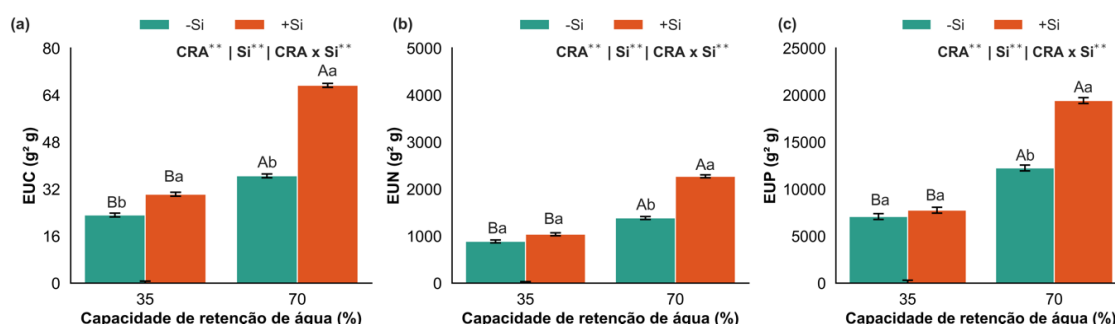


Figura 8. EUC (a), EUN (b), EUP (c) de plantas de cana-de-açúcar cultivada em duas capacidades de retenção de água no solo (35 e 70%) e suprimento de silício (ausência e presença) após emergência da primeira soqueira de cana-de-açúcar cultivada em condições de déficit hídrico (35% da CRA) e regime hídrico adequado (70% da CRA) combinado com a ausência (0 mM) e presença (1.8 mM) da fertirrigação com silício (ausência e presença). As letras maiúsculas diferentes diferem entre a capacidade de retenção de água no solo e as letras minúsculas diferentes diferem entre o suprimento do Si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

4.9. Modificações na altura das plantas, diâmetro do colmo e número de perfilhos

O déficit-hídrico, na ausência do Si, diminuiu a altura das plantas, diâmetro do colmo, número de perfilhos e massa seca da parte aérea. A aplicação do silício,

aumentou a altura de plantas, o diâmetro do caule, o número de perfilhos e a massa seca no regime de 35% da CRA, enquanto no regime hídrico adequado (70% da CRA) houve incremento na altura das plantas, no diâmetro do caule e na massa seca da parte aérea (figura 9).

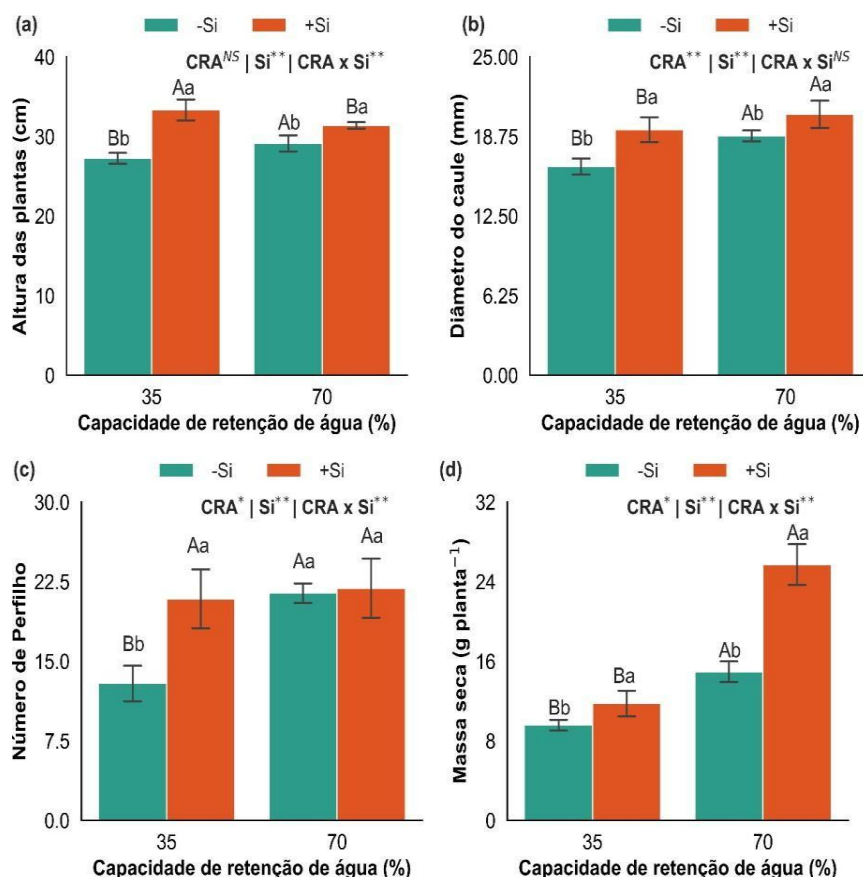


Figura 9. Altura das plantas (a), diâmetro do caule (b) e número de perfilhos (c) de plantas de cana-de-açúcar cultivada em duas capacidades de retenção de água no solo (35 e 70%) e suprimento de silício (ausência e presença) após a emergência da primeira soqueira de cana-de-açúcar cultivada em condições de déficit hídrico (35% da CRA) e regime hídrico adequado (70% da CRA) combinado com a ausência (0 mM) e presença (1.8 mM) da fertirrigação com silício (ausência e presença). As letras maiúsculas diferentes diferem entre a capacidade de retenção de água no solo e as letras minúsculas diferentes diferem entre o suprimento do Si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

4.10. Produtividade

O déficit hídrico, na ausência do Si, reduziu a produtividade. Adicionalmente, nos dois regimes hídricos (35% e 70% da CRA) a aplicação de silício promoveu incremento na produtividade (Figura 11).

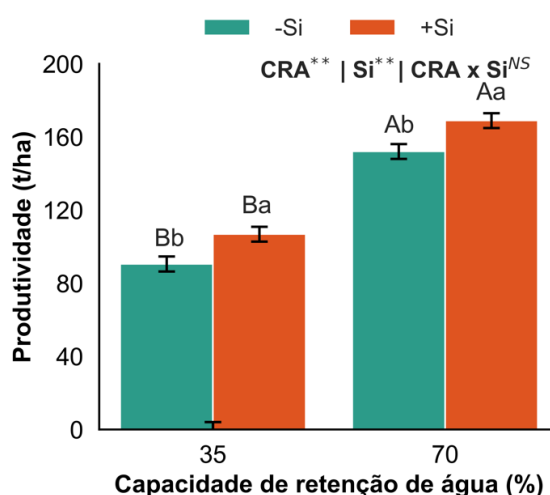


Figura 10. Produtividade de plantas de cana-de-açúcar após emergência da primeira soqueira de cana-de-açúcar cultivada no primeiro ciclo de cultivo em condições de déficit hídrico (35% da CRA) e regime hídrico adequado (70% da CRA) combinado com a ausência (0 mM) e presença (1.8 mM) da fertirrigação com silício (ausência e presença). As letras maiúsculas diferentes diferem entre a capacidade de retenção de água no solo e as letras minúsculas diferentes diferem entre o suprimento do Si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

4.11. Agrupamento hierárquico

Os resultados da análise de agrupamento hierárquico indicaram similaridade com o extravasamento de eletrólitos, o que aponta maior estresse oxidativo e comprometimento da integridade das membranas celulares com a condição de 35% da CRA na ausência do Si. Adicionalmente, evidenciou menores teores de Si nos tecidos e menor acúmulo de biomassa e de carbono estrutural, sugerindo dificuldades na homeostase nutricional sob déficit hídrico na condição de 35% da CRA (-Si). Observa-se também menor valor em (F_0/F_m), possivelmente associada ao maior estresse fotoquímico. O teor total de N e o acúmulo de P são relativamente baixos, sugerindo dificuldades na absorção e

mobilização desses nutrientes em condições adversas.

Para a condição de 35% da CRA associado ao suprimento do Si, o agrupamento hiérarquico indicou maior similaridade com a melhora a integridade da membrana celular, reduzindo o extravasamento de eletrólitos. E ainda, o aumento na concentração de Si nos tecidos foi correlacionado com um melhor acúmulo de biomassa e maior eficiência fotossintética. Os teores de clorofila (Chl a e Chl b) são mais elevados em comparação ao tratamento sem Si na condição de CRA de 35%, sugerindo menor degradação de pigmentos e melhor adaptação ao estresse hídrico (Figura 12).

O agrupamento hiérarquico indicou para a condição de 70% da CRA, na ausência do Si, que houve maior similaridade com a diminuição do extravasamento de eletrólitos e melhor estabilidade da fotossíntese. E ainda, o acúmulo de C e de N nos tecidos foram superiores aos das plantas sob 35% da CRA, refletindo em maior eficiência no metabolismo e no crescimento. Para a condição de 70% com suprimento do Si, evidenciou melhoria nos indicadores de eficiência fisiológica e nutricional, com maior teor de Si nos tecidos e maior eficiência do aparato fotossintético.

Além disso, houve melhoria nos teores de clorofila e de carotenoides, evidenciando melhor manutenção da maquinaria fotossintética e menor degradação de pigmentos. A correlação positiva com variáveis como acúmulo de biomassa e de acúmulo de nutrientes sugere que o Si potencializa o metabolismo, mesmo sob condições adequadas de água. A redução do extravasamento de eletrólitos e o maior acúmulo de C e P demonstram que o Si melhora a estabilidade das membranas celulares e a homeostase nutricional

(Figura 12).

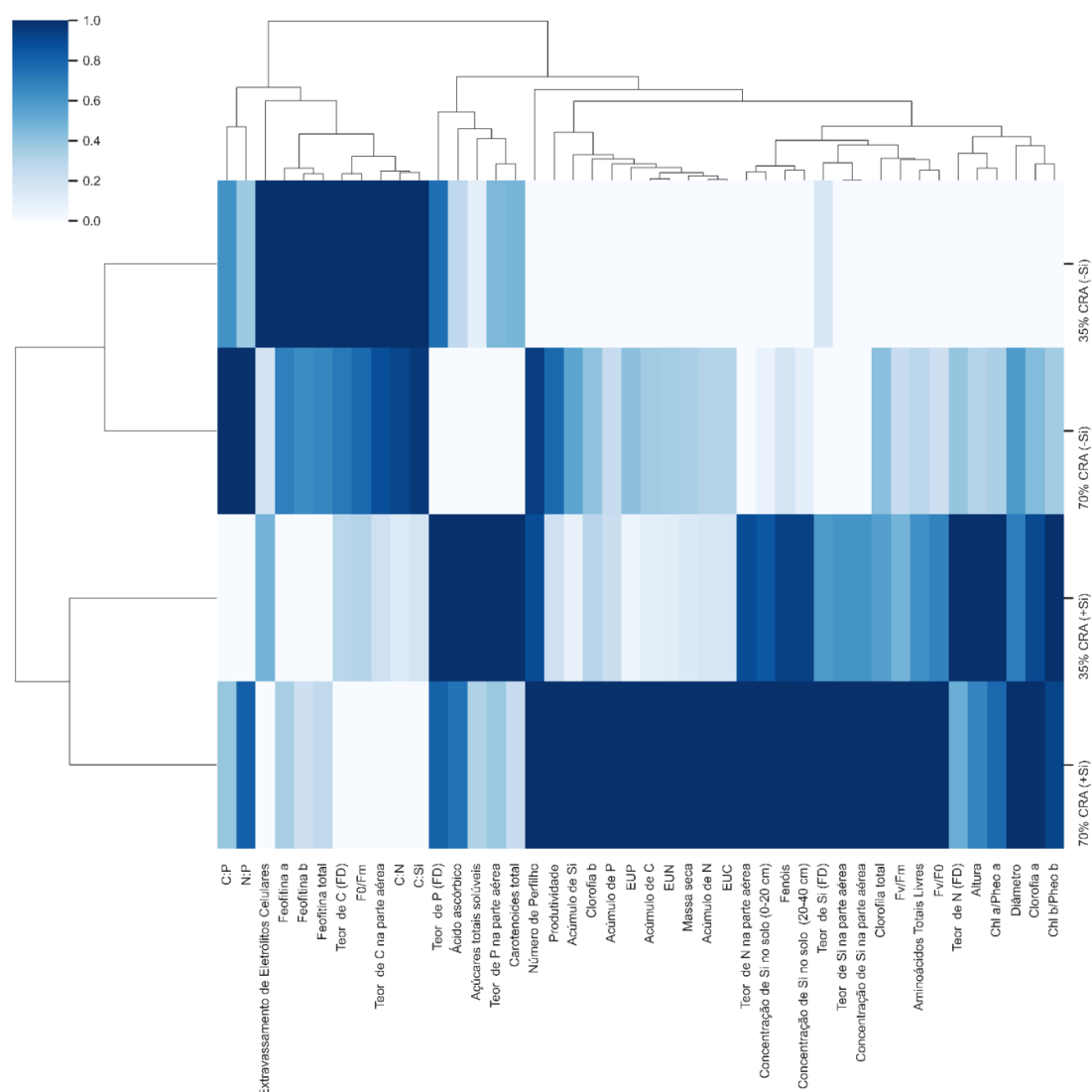


Figura 11. Análise de agrupamento hierárquico das variáveis respostas de plantas de cana-de-açúcar cultivada em duas capacidades de retenção de água no solo (35 e 70%) e suprimento de silício (ausência e presença) aos vinte dias após emergência do broto da primeira soqueira de cana-de-açúcar cultivada no primeiro ciclo de cultivo em condições de déficit hídrico (35% da CRA) e regime hídrico adequado (70% da CRA) combinado com a ausência (0 mM) e presença (1.8 mM) da fertirrigação com silício (ausência e presença). FD: folha diagnóstica; EUC: Eficiência de uso de C; EUN: Eficiência de uso de N; EUP: Eficiência de uso de fósforo; Fv/Fm: Eficiência fotoquímica do fotossistema II; Fv/F0: Eficiência de conversão de energia absorvida; F0/Fm: Rendimento máximo não fotoquímico.

4.12. Componentes principais

A análise dos componentes principais das variáveis nutricionais, biométricas e biomassa explicaram 78.2% das variação, sendo 55% explicado

pelo PC1 e 23.2% pelo PC2 (Figura 13a). A condição de 35% da CRA, na ausência do Si, apresentou correlação forte com a concentração de C e razão C:Si e C:N e apresentou menor associação com variáveis relacionadas à eficiência nutricional e ao acúmulo de biomassa (Figura 13a). A condição de 35%, com suprimento de Si, está fortemente associado aos teores de P e N na parte aérea e também apresenta correlação com altura das plantas, indicando um efeito positivo do Si no crescimento mesmo sob limitação hídrica (Figura 13a).

A condição de 70% da CRA, na ausência do Si, associou-se ao teor de C na parte aérea e também à razão C:P na parte aérea. Para a condição de 70% da CRA, associado ao suprimento de Si, foram apontados altos teores de Si no solo (0-20 cm e 20-40 cm), na folha diagnóstica e na parte aérea, refletindo um maior acúmulo desse elemento quando suplementado. E ainda, fortemente associado à produtividade, indicando que a combinação de boa disponibilidade hídrica e silício maximiza o rendimento da cultura. A correlação com número de perfilhos e eficiência do uso de P sugere que a presença de Si melhora o aproveitamento dos nutrientes e a capacidade de crescimento das plantas (Figura 13a).

A análise dos componentes principais das variáveis fisiológicas, biométricas e biomassa explicaram 82,0% das variações, sendo 63,0% explicado pelo PC1 e 19,0% pelo PC2 (Figura 13b). O aumento do extravasamento de eletrólitos celulares e rendimento máximo não fotoquímico foram associados à condição de 35% da CRA na ausência do Si (Figura 13b). O aumento do ácido ascórbico, dos carotenóides, dos açúcares solúveis totais e da altura foram

associados a condição de 35% da CRA combinados com o suprimento do Si (Figura 13b). A condição de 70% da CRA, na ausência do Si foi associado ao aumento das concentrações de feofetina a, b e total (Figura 13b). E por fim, a condição de 70% da CRA com o suprimento do Si foi associada a clorofila a e b, aos aminoácidos livres, à eficiência fotoquímica do fotossistema II, à massa seca e produtividade (Figura 13b).

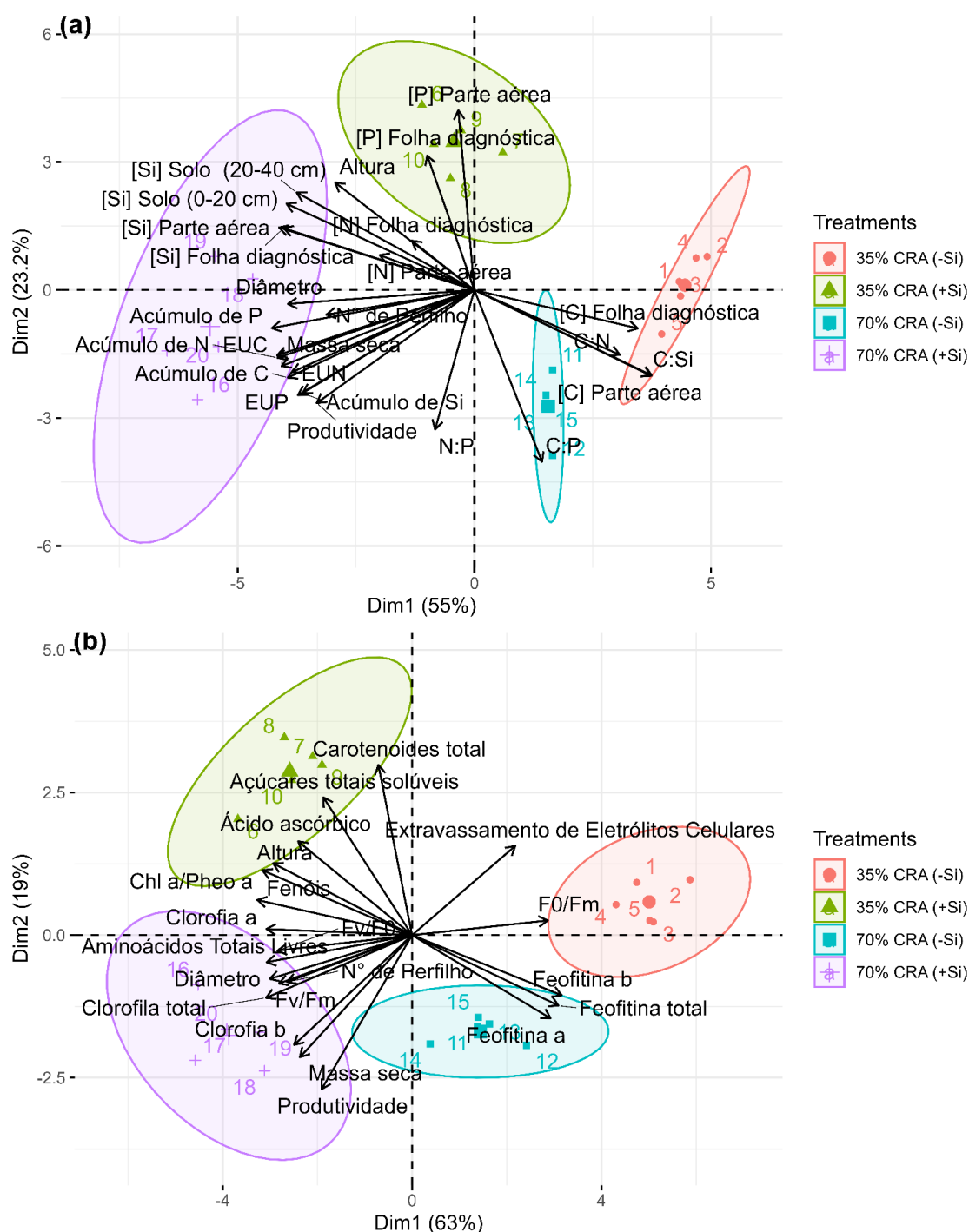


Figura 12. Análise de componentes principais das variáveis nutricionais, biométricas e biomassa (a) e das variáveis fisiológicas, biométricas e biomassa (b) de plantas de cana-de-açúcar cultivada em duas capacidades de retenção de água no solo (35 e 70%) e suprimento de silício (ausência e presença) aos vinte dias após emergência do broto da primeira soqueira de cana-de-açúcar cultivada no primeiro ciclo de cultivo em condições de déficit hídrico (35% da CRA) e regime hídrico adequado (70% da CRA) combinado com a ausência (0 mM) e presença (1.8 mM) da fertirrigação com silício (ausência e presença). EUC: Eficiência de uso de C; EUN: Eficiência de uso de N; EUP: Eficiência de uso de fósforo; Fv/Fm: Eficiência fotoquímica do fotossistema II; Fv/F0: Eficiência

de conversão de energia absorvida; F0/Fm: Rendimento máximo não fotoquímico.

5. DISCUSSÃO

A diminuição da concentração de Si na camada superficial do solo sob déficit-hídrico, na ausência de suplementação, pode ser atribuída à menor solubilidade e mobilidade do Si em solos sob déficit-hídrico. (REZENDE et al., 2019) mostraram que a disponibilidade de Si é reduzida em condições de seca devido à menor atividade de transporte de água e de nutrientes. Esse estudo também observou que a suplementação de silício aumenta, significativamente, a concentração de Si no solo, tanto na camada superficial quanto na subsuperficial, mesmo em condições de déficit hídrico. (ASSIS et al., 2020) destacaram que a aplicação de fertilizantes à base de Si melhora a disponibilidade de Si no solo, contribuindo para a resiliência das plantas em ambientes estressados pela seca. A suplementação de silício aumentou a concentração de Si na parte aérea das plantas, refletindo sua absorção e translocação para os tecidos vegetais. (MORAES et al., 2021) relataram que o silício desempenha um papel crucial na fisiologia da cana-de-açúcar, especialmente em condições de estresse hídrico. Eles observaram que plantas suplementadas com silício apresentaram maiores concentrações de Si nos tecidos foliares, contribuindo para a manutenção da integridade celular e para a redução do estresse oxidativo.

O aumento do acúmulo de Si na parte aérea das plantas suplementadas com Si é corroborado por estudos de (OLIVEIRA et al., 2020) e (SILVA et al., 2020). (Oliveira et al., 2020) demonstraram que o Si pode melhorar a eficiência do uso da água e a resistência ao estresse hídrico, explicando o maior acúmulo

de Si na parte aérea das plantas suplementadas com Si. (SILVA et al., 2021) acrescentaram que a presença de Si nas folhas e nos caules pode fortalecer as paredes celulares, ajudando a planta a resistir melhor às condições de seca e a melhorar a eficiência fotossintética.

A redução da altura das plantas, o número de perfilhos, o diâmetro do colmo e, conseqüentemente, a massa seca ocorrem devido ao cultivo da soqueira da cana-de-açúcar sob déficit hídrico, que é o principal fator abiótico responsável pela perda de produtividade na cultura da cana-de-açúcar, sendo especialmente crítico durante a fase de estabelecimento do campo (JAIN et al., 2019). No estudo de (TEIXEIRA et al., 2020), observou-se que o déficit hídrico causou um efeito prejudicial no crescimento da soqueira ao reduzir o teor relativo de água na planta, desencadeando estresse oxidativo. Este estresse foi indicado pelo aumento na taxa de extravasamento de eletrólitos celulares e no teor de prolina, o que resultou na diminuição dos pigmentos fotossintéticos, como clorofilas e carotenoides, comprometendo a eficiência quântica do FSII e, conseqüentemente, o crescimento das plantas (em altura e diâmetro), o número de perfilhos e a produção de massa seca.

No entanto, neste trabalho, nos tratamentos com aplicação de Si, houve aumento em todas essas variáveis e, conseqüentemente, na produtividade que foi medida em (t/ha), mesmo sob déficit hídrico. Desta forma, a aplicação de Si destacou-se na mitigação dos danos causados pelo déficit hídrico, promovendo aumento na altura das plantas, no número de perfilhos, no diâmetro do colmo e na massa seca. Estudos de (TEIXEIRA et al., 2020), (VERMA et al., 2020) e (CAMARGO et al., 2019) corroboram esses achados,

demonstrando os benefícios do Si no crescimento de plantas de cana-de-açúcar sob condições de déficit hídrico.

Estudos semelhantes indicam que a fertilização com Si é eficaz na redução do estresse oxidativo, evidenciado por um menor índice de vazamento de eletrólitos celulares, provavelmente devido ao aumento da atividade dos mecanismos de defesa antioxidante, prevenindo a peroxidação dos lipídios da membrana (OLIVEIRA FILHO et al., 2021). Além disso, nesse trabalho foi observado que o Si aumentou a quantidade de compostos antioxidantes, como os fenólicos, o ácido áscorbico, entre outros, o que contribuiu para a elevação da eficiência quântica do FSII, evitando a degradação de pigmentos como a clorofila e reduzindo a quantidade de feofitinas, o que manteve a integridade do aparato fotossintético da planta sob estresse hídrico (CAMARGO et al., 2019). A aplicação de silício atenuou os efeitos do déficit hídrico ao aumentar os teores de clorofila a e b, o ácido ascórbico e os compostos fenólicos, além de reduzir as feofitinas e o extravasamento de eletrólitos, especialmente sob o regime de 35% da CRA. Tudo isso está associado ao silício atuar na proteção do aparato fotossintético e na preservação da integridade celular, por meio do fortalecimento das membranas e da ativação de mecanismos antioxidantes (SOUZA et al., 2018). Os compostos fenólicos atuaram como moléculas de defesa, neutralizando espécies reativas de oxigênio (EROs) geradas pelo estresse hídrico, enquanto o ácido ascórbico desempenhou papel central na desintoxicação de radicais livres e na regeneração de outros antioxidantes celulares (ZHU et al., 2004). Portanto, tais fatores foram fundamentais no aumento da eficiência do sistema fotossintético, como vamos ver adiante.

A eficiência fotoquímica do FS II (F_v/F_m) é um indicador crucial da eficiência fotossintética. (SILVA et al., 2020) demonstraram que a suplementação com Si pode mitigar os efeitos negativos do estresse hídrico em cana-de-açúcar, aumentando a eficiência do FS II. Estudos de (GOMES et al., 2021) também mostraram que o Si ajuda a proteger o aparato fotossintético em condições de seca. Nossos achados de aumento de F_v/F_m em plantas suplementadas com Si sugerem que este elemento desempenha papel fundamental na proteção do FS II.

A eficiência da conversão de energia absorvida (F_v/F_0) reflete a capacidade das plantas de utilizar a energia absorvida pela clorofila. (OLIVEIRA et al., 2019) indicaram que a suplementação com Si aumenta a eficiência da conversão de energia em plantas de cana-de-açúcar sob estresse hídrico. A melhoria na eficiência de conversão é atribuída à capacidade do Si de manter a integridade das membranas celulares e de proteger os complexos proteicos fotossintéticos. Nossos resultados corroboram esses achados, mostrando um aumento significativo de F_v/F_0 com a fertirrigação com Si.

O rendimento máximo de excitação não fotoquímica (F_0/F_m) indica a quantidade de energia dissipada como calor em vez de ser usada na fotossíntese. (ALMEIDA et al., 2020) observaram que plantas de cana-de-açúcar, suplementadas com silício sob estresse-hídrico, mostraram uma redução na dissipação de energia não fotoquímica, semelhante aos nossos resultados. A redução de F_0/F_m , em plantas suplementadas com silício, sugere que este elemento ajuda a reduzir a dissipação de energia excessiva, mantendo a eficiência fotossintética.

Adicionalmente, a aplicação de Si em plantas de cana-de-açúcar favorece o aumento dos teores de Nitrogênio por melhorar a absorção radicular, por estimular a atividade de enzimas relacionadas ao metabolismo do N e por reduzir perdas por volatilização, especialmente em condições de estresse. Além disso, o silício contribui para maior eficiência no uso da água e na regulação estomática, mantendo a planta em condições fisiológicas favoráveis à assimilação de nutrientes. Como o nitrogênio é um dos principais componentes da molécula de clorofila, sua maior disponibilidade resulta em elevação dos teores de clorofila nas folhas, o que intensifica a capacidade fotossintética da planta, promovendo maior acúmulo de biomassa e eficiência produtiva (MARCARI., 2024).

Uma descoberta interessante foi a correlação negativa entre as concentrações de C e Si, indicando uma possível troca entre esses elementos. Com o aumento da concentração de Si, observou-se uma diminuição no teor de C, sugerindo que a planta pode estar utilizando o carbono de maneira mais eficiente ao absorver mais Si. Esse fenômeno pode estar relacionado à formação de fitossilicatos nas paredes celulares, processo que reduz a demanda por compostos ricos em carbono, impactando, diretamente, a necessidade de carbono por grama de massa seca sintetizada (COSTA et al., 2024).

Além disso, a correlação positiva entre N, P e Si sugere que o Si pode estar facilitando a absorção e a disponibilidade desses nutrientes, funcionando como um aprimorador na capacidade da planta de se nutrir de forma mais equilibrada e eficiente (COSTA et al., 2024). Quando analisamos as razões estequiométricas C:N, C:P e C:Si, a redução observada nestas relações reflete

como o Si, ao ser integrado ao metabolismo da planta, ajusta esses balanços para otimizar o uso dos recursos disponíveis. Esse efeito foi particularmente evidente sob condições de 70% da capacidade de retenção de água (CRA), onde o Si promoveu um aumento significativo na biomassa das folhas e dos colmos. Em contraste, sob a restrição hídrica de 35%, o benefício do Si foi menos pronunciado, mas ainda assim notável. A menor resposta sob déficit hídrico pode estar relacionada à redução na absorção de Si, enquanto a escassez de água afeta, diretamente, a capacidade das plantas de absorver tanto os nutrientes quanto o silício, resultando em menor acúmulo de Si (COSTA et al., 2024).

Pesquisas recentes, como as de (DUTRA et al., 2023), também chegaram a resultados e conclusões similares, destacando que a fertilização com Si altera a estequiometria C:N:P e melhora a utilização de C e P em condições de campo.

6. CONCLUSÃO

Com base nos estudos científicos analisados, podemos concluir que o efeito residual na primeira soqueira da cana-de-açúcar, após a aplicação de Si na cana-planta sob condições de déficit-hídrico, apresenta benefícios significativos no crescimento, no desenvolvimento e na eficiência fotossintética dessas plantas.

O efeito residual da fertilização com Si demonstrou reduzir o estresse oxidativo nas plantas, refletido pela diminuição do vazamento de eletrólitos celulares e pelo aumento na eficiência dos mecanismos de defesa antioxidantes, como compostos fenólicos e ácido ascórbico. Com isso, o efeito residual do elemento contribuiu para a manutenção da integridade do aparato fotossintético,

aumentando a quantidade de clorofila e reduzindo as feofitinas, o que elevou a eficiência da fotossíntese e do Fotossistema II.

Além disso, os resultados indicam que o resíduo da aplicação de Si modula a utilização de C e de nutrientes pelas plantas, com uma correlação negativa entre C e Si, sugerindo que o aumento de Si pode otimizar o uso de C. Além disso, o Si parece facilitar a absorção de N e P, promovendo melhor balanço nutricional. Esse efeito foi mais forte sob maior disponibilidade hídrica, mas ainda perceptível em condições de déficit hídrico. Também, foram evidenciados os benefícios do Si na otimização da estequiometria C:N:P e no uso mais eficiente de nutrientes.

Esses resultados indicam que o efeito residual do Si pode desempenhar um papel fundamental e apresentar grande potencial na proteção das plantas de cana-de-açúcar contra os efeitos adversos do estresse hídrico. Portanto, o estudo do efeito residual da aplicação do Si pode ser uma estratégia promissora para aumentar a resiliência das plantas de cana-de-açúcar em ambientes sujeitos ao déficit hídrico, contribuindo para uma produção mais sustentável e eficiente.

REFERÊNCIAS

- Almeida, A. F., Soares, L. F., Nogueira, L. M., et al. Silicon-induced changes in photosynthetic performance and antioxidant capacity of sugarcane under drought stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, 151: 621-630, 2020.
- Assis, F. A., Silva, G. H., Lima, R. M. Silicon fertilization increases soil silicon availability and sugarcane yield under water deficit conditions. **Agronomy Journal**, 112: 3308-3318, 2020.
- Barbosa, F. S. Resistência à seca em cana-de-açúcar para diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo. **Dissertação (Mestrado em Agronomia)** -

Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, Piracicaba, 81 f, 2010.

Bezerra, B. K. L., Lima, G. P. P., Dos Reis, A. R., Silva, M. A., & Camargo, M. S. Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum**, 41: 189, 2019.

Carmo, C. A. F., Araújo, W. S., Bernardi, A. C. C., Saldanha M.F.C. Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos. **Embrapa, Rio de Janeiro**, 2000.

Carvalho, J. M., Silva, D. L., Oliveira, A. C., et al. Water availability and its influence on photosynthetic efficiency in sugarcane. **Photosynthetica**, 59: 472-481, 2021.

Camargo, M. S., Bezerra, B.K.L., Holanda, L.A., Oliveira, A. L., Vitti, A. C., Silva, M. A. Silicon fertilization improves physiological responses in sugar cane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 19: 81–91, 2019.

Camargo, M. S., Fernández Honaine, M., Osterrieth, M., Bozza, N. G., Silva, V. M., Benvenuto, M. L., Silva, M. L. Silicon fertilization increases gas-exchange and biomass by silicophytolith deposition in the leaves of contrasting drought-tolerant sugarcane cultivars under well-watered conditions. **Plant and Soil**, 466: 581–595, 2021.

Camargo, M. S., Keeping, M. G. Silicon in sugarcane: availability in soil, fertilization, and uptake. **Silicon**, 13: 3691–3701, 2021.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos: Safra 2023/24 – Décimo segundo levantamento. Brasília: **CONAB**, 2024.

Costa, M. G., Prado, R. M., Sarah, M. M. S., Júnior, J. P. S., Souza, A. E. S. Silicon, by promoting a homeostatic balance of C:N:P and efficiency in the use of nutrients, attenuates K deficiency, favoring the sustainable cultivation of bean. **BMC Plant Biology**, 23: 213, 2023.

Costa, M. G., Prado, R. M., Palaretti, L. F., Júnior, J. P. S. The effect of abiotic stresses on plant C:N homeostasis and their mitigation by silicon. **The Crop Journal**, 12: 340-353, 2024.

Donagema, G. K., De Campos, D. B., Calderano, S. B., Teixeira, W. G., Viana J. M. Manual de métodos de análise de solo. **Embrapa Solos-Documentos**, (INFOTECA-E), 2011.

Doorembos, J; Kassam, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande, (**FAO. Estudos FAO. Irrigação e drenagem**), Ed. UFPB, n 33: 306, 1994.

Dutra, A. F., Leite, M.R. L., Melo, C. C. D. F et al. Soil and foliar Si fertilization

alters elemental stoichiometry and increases yield of sugarcane cultivars. **Scientific Reports**, 13: 16040, 2023.

Flores, R. A., Prado, R. M., Politi, L. S., Almeida, T. B. F. Potássio no desenvolvimento inicial da soqueira de cana crua. **Pesquisa Agropecuária Tropical, Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos/UFG**, 42: 106 - 111, 2012.

Gastwirth, J. L., Gel, Y.R., Miao, W. The impact of levene's test of equality of variances statistical theory and practice. **Statistical Science**, 24: 343 – 360, 2009.

Gomes, J. M., Santos, M. G., Andrade, A. G., et al. The role of silicon in enhancing the tolerance of sugarcane to drought stress. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 184: 95 - 104, 2021.

Hoang, T. H., Hiroo, T., Yoshinobu, K. Nitrogen use efficiency and drought tolerant capacity of various sugarcane varieties under drought stress at early growth stage. **Taylor and Francis**, 250 - 261, 2018.

JAIN, M; KATARIA, S; HIRVE, M; PRAJAPATI, R. Water deficit stress effects and responses in maize. In: Hasanuzzaman M, Hakeem K, Nahar K, Alharby H (eds) Plant abiotic stress tolerance: agronomic, molecular and biotechnological approaches. **Springer**, 129 – 151, 2019.

Keller, J., Karmeli D. Trickle irrigation design. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation. Análise de silício: solo, planta e fertilizante. **Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, 2004.

Kim, Y. H; Khan, A.L; Waqas, M; Lee, I. J. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: A Review. **Frontiers in Plant Science**, 8: 1-7, 2017.

Korndorfer, G.; Souza, S. R. Elementos benéficos. **Nutrição Mineral de Plantas**, 15: 563-599, 2018

Lanna, A. C. Importância do silício para a sustentabilidade da produção de arroz de terras altas no Cerrado brasileiro. Brasília: **Embrapa**, 2021.

Liang Y; Chen, Q; Liu, Q; Zhang, W; Dinga, R. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). **Journal of Plant Physiology** 160:1157-1164, 2003.

Lichtenthaler, H. K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods Enzymology**. 148: 350 – 382, 1987.

Liu, X. Silicon regulates nitrogen assimilation and enhances stress tolerance in plants. **Frontiers in Plant Science**, 11: 1007, 2020.

Lucena, R. A. F.; Demartelaere, A. C. F.; Preston, H. A. F.; Preston, W.; Feitosa, S. dos. S. F.; Ferreira, A. dos. S.; Silva, H. F. da; Santos, J. J. M. dos. **Brazilian Journal of Development**, 6: 64881 - 64892, 2020.

Ma, J. F.; Yamaji, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, 11: 92 – 397, 2006.

Ma, J.F; Yamaji, N; Mitani-ueno, N. Transport of silicone from roots to panicles in plants. **Proceedings of the Japan Academy, Series B, Physssical and Biological Sciences**, 87: 377-385, 2011.

Ma, J. F.; Yamaji, N. A cooperative system of silicon transport in plants. **Trends in Plant Science**, 20: 435 – 442, 2015.

Manter, M. G., Ramburan, S., Nxumalo, N. Does green cane harvesting and residue retention improve silicon uptake in ratoon crops of sugarcane? **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 123: 105 – 118, 2022.

Manhães, J. F.; Yamaji, N. A cooperative system of silicon transport in plants. **Trends in Plant Science**, 20: 435 – 442, 2015.

Marcari, E. O. Impacto do Silício na estequiometria C:N:P, na eficiência nutricional e na produtividade da primeira soqueira de cana-de-açúcar em condições de campo sob diferentes regimes hídricos. **Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Agrônômica) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Jaboticabal, 2024.**

Melo, C. G. B. Analise de falha de brotação da cana-de-açúcar a partir de metodologia manual e geoprocessamento em um sistema de cultivo mecanizado. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola) – **Universidade Federal Rural de Pernambuco**, Recife, 49, 2022.

Moraes, D. F., Silva, T. R., Franco, H. C. J. The role of silicon in alleviating drought stress in sugarcane: Physiological and biochemical responses. **Plant Physiology and Biochemistry**, 159: 34 - 45, 2021.

Oliveira, L. A., Lima, S. F., Barbosa, J. P., et al. Silicon application improves the physiological performance of sugarcane under drought conditions. **Environmental and Experimental Botany**, 167: 38 - 42, 2019.

Oliveira, R. S., Lima, S. F., Barbosa, J. P. Silicon application enhances the drought tolerance in sugarcane by improving physiological performance and antioxidant capacity. **Environmental and Experimental Botany**, 168: 103885, 2020.

Oliveira filho, A. S. B., Prado, R. M., Teixeira, G. C. M., Rocha, A. M. S., Junior, J. P. S, Piccolo, M. C., Rocha, J. R. Silicon attenuates the effects of water deficit in sugarcane by modifying physiological aspects and C:N:P stoichiometry and its use efficiency. **Agricultural Water Management**, 255:

107006, 2021.

Olivera, V. D., Prado, R. M., Martinez, C.A., Habermann, E., De Cássia, P. M., Calero, H. A., Barreto, R.F., Peña, C. K. Changes in soil water availability and air-temperature impact biomass allocation and C:N:P stoichiometry in different organs of *Stylosanthes capitata* Vogel. **Journal of Environmental Management**, 278: 111540, 2021.

Pereira, L. A. G; Barreto, J. B. Geografia das exportações de açúcar e de etanol no estado de Minas Gerais. **Revista Campo-Território**, 15: 230-258, 2020.

Raij, B. Van., Cantarella, H., Quaggio, J. A., Furlani, Â. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo,). **Campinas: IAC**. 1997.

Raij B, Andrade J, Cantarella H, Quaggio J. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. **Campinas: IAC**, 285p, 2001.

Reichert, J. M., Albuquerque, J. A., Peraza, J. E. S., Costa, A. Estimating water retention and availability in cultivated soils of southern Brazil. **Geoderma Regional**, 27: 00277, 2020.

Rezende, R. M., Silva, A. L., Souza, R. T. Silicon application in sugarcane underwater deficit: Effects on growth and yield. **Scientia Agricola**, 76: 278-284, 2019.

Royston, P. Remark AS R94: A remark on algorithm AS 181: The W-test for normality. **Journal of the Royal Statistical Society** 44: 547–551, 1995.

Santos, L. C. The role of silicon in plants. **Research, society and development**, 10: 3810716247, 2021.

Segato, S. V; Mattiuz, C. F. M; Mozambani, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. **Atualização em Produção de Cana-de-Açúcar**. Piracicaba: 2: 19-36, 2006.

Shukla, S. K., Yadav, R. L., Gupta, R., Singh, A. K., Awasthi, S. K., Gaur, A. Deep tillage, Soil moisture regime, and optimizing N nutrition for sustaining soil health and sugarcane yield in subtropical India. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 49: 444–462, 2018.

Siddiqi, M. Y., Glass, A. D. M. Utilization index: a modified approach for estimating and comparing nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, 4: 289–302, 1981.

Silva, A. R., Ferreira, M. A., Oliveira, G. M., et al. Silicon supplementation enhances photosynthetic efficiency and mitigates water deficit in sugarcane. **Agronomy Journal**, 112: 945-954, 2020.

Singleton, V. L., Rossi, J.A.J. Colorimetry to total phenolics with acid reagents. **American Journal Enology and Viticulture**, 16: 144–58, 1965.

Strohecker, R., Henning, H. M., Libman, D. D. "Vitamin assay. Tested methods." **Nature**, 209: 232–233, 1965.

Souza, J. Z; Prado, R. M; Silva; S. L. O; Farias, T. P; Garcia N. J; Souza Junior, J. P. Silicon leaf fertilization promotes biofortification and increases dry matter, ascorbate content, and decreases post-harvest leaf later loss of chard and kale. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. 50:164-172, 2018.

Souza, J . Z; Prado, R. M; Silva , S . L; Farias, T. P; Neto, J . G; Souza, J, Z. Silicon leaf fertilization promotes biofortification and increases dry matter, ascorbate content and decreases post-harvest leaf water loss of chard and kale. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. 2019.

Tadesco, M. J., Gianello, C., Bissani, C.A., Bohnen, H., Volkweiss, S. J. Análises de solo, plantas e outros materiais. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 1995.

Teixeira, G. C. M., Prado, R. M., Rocha, A. M. S., Piccolo, M. D. C. 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**, 0240847, 2020.

Teixeira, G. C. M., Prado, R. M., Rocha, A. M. S. The low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating the water deficit damage in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 208: 805-814, 2022.

Teixeira, G.C.M., Prado, R. M., Rocha, A.M.S., Junior, G. S. S., Gratão, P. L. Beneficial effect of silicon applied through fertigation attenuates damage caused by water deficit in sugarcane. **Journal of Plant Growth Regulation**, 41: 3255–3270, 2022.

Verma, C. L., Li, Y. R. The impact of silicon on photosynthetic and biochemical responses of sugarcane under different soil moisture levels. **Silicon**, 12: 1355–1367, 2020.

Xu, D. Silicon addition improves plant productivity and soil nutrient availability without changing the grass: legume ratio response to N fertilization. **Scientific Reports**, 10: 1 – 9, 2020.

Zou, M; Yuan, L; Zhu, S; Liu , S; Ge, J; Wang, C. Effects of heat stress on photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of a heat-sensitive and heat-tolerant cultivar of wucai (*Brassica campestris* L.). **Acta and Physiologiae Plantarum**. 2019.

Zhu, Z; Wei, G; Li, J. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Plant and Science**. 167: 527-533, 2004.