

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

Eduardo de Oliveira Marcari

**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**

**JABOTICABAL
2024**

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

**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**

Eduardo de Oliveira Marcari

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: MSc. Milton Garcia Costa

Trabalho apresentado à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP,
Campus de Jaboticabal, para graduação
em ENGENHARIA AGRÔNOMICA.

Jaboticabal – SP
Primeiro Semestre/2024

M313i

Marcari, Eduardo de Oliveira

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 / Eduardo de Oliveira Marcari. -- Jaboticabal, 2024

61 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. Nutrição das Plantas. 2. Cana-de-açúcar. 3. Silício. 4. Irrigação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus Jaboticabal



EDUARDO DE OLIVEIRA MARCARI

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

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado
Coorientador: M.Sc. Milton Garcia Costa

Área de Concentração: Nutrição de Plantas

Data da defesa: 25/09/2024

(X) Aprovado
() Reprovado

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
RENATO DE MELLO PRADO
Data: 26/10/2024 12:27:33-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Renato de Mello Prado
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
CARLOS VITAL GONZALEZ PORRAS
Data: 29/10/2024 08:49:54-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

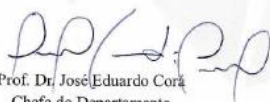
M. Sc. Carlos Vital Gonzalez Porras
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
DEYVILEN MARIA RAMOS ALVES
Data: 29/10/2024 21:34:43-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

M. Sc. Deyvilen Maria Ramos Alves
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 05/11/24 Aprovado Ad Referendum do Conselho do Departamento


Prof. Dr. José Eduardo Corá
Chefe do Departamento

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso contou com a ajuda de diversas pessoas, dentre as quais agradeço:

Primeiramente à Deus por ter dado saúde e força para superar todas as adversidades, me permitindo ser resiliente em todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu não apenas chegasse até esta grande etapa de minha vida, mas também colaboraram com todas as etapas anteriores.

Aos amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio, força e cumplicidade demonstrado ao longo de todo período em que me dediquei a este trabalho.

Aos meus queridos professores que se dedicaram a ensinar e compartilhar todo o seu conhecimento contribuindo em minha formação profissional, especialmente, o Prof. Dr. Renato de Mello Prado, responsável pela orientação do meu projeto. Agradeço também ao meu coorientador MSc. Milton Garcia Costa pela excelente orientação metodológica, contribuindo com todas as revisões de conteúdo, além de todos os ensinamentos e valiosas contribuições dadas durante todo o processo.

À todas as pessoas que tive a oportunidade de estagiar durante a minha formação acadêmica, as quais trocamos conhecimentos, experiências e direcionamentos nas quais vou levar comigo para o resto de minha vida.

Agradeço ainda à Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal, e todo seu corpo docente por ser essa referência no ensino de qualidade.

Por fim, e não menos importante, às pessoas com quem convivi ao longo desses anos de curso, que compartilharam comigo muitos momentos de descobertas, aprendizado, conhecimentos, companheirismo, erros, acertos, vitórias e alegrias. Hoje, amigos para se levar para a vida toda.

EPÍGRAFE

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível”

(Charles Chaplin)

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1 Sistema de cultivo e Produção da cana-de-açúcar	13
2.2 Déficit Hídrico	16
2.3 Papel do Si nas plantas	19
2.4 Impacto do déficit Hídrico no equilíbrio homeostático C:N:P e sua atenuação pelo silício.....	23
3. METODOLOGIA	26
3.1 Área experimental e condições climáticas.....	26
3.2 Delineamento experimental.....	28
3.3 Sistema e manejo de irrigação.....	29
3.4 Manejo da adubação.....	30
3.5 Manejo do silício.....	31
3.6 Avaliações experimentais.....	32
3.6.1 Análise de produção de massa seca e produtividade	32
3.6.2 Determinação das concentrações de C, N, P e Si.....	32
3.6.3 Razões estequiométricas e acúmulo de C, N, P e Si.....	33
3.6.4 Eficiência dos usos de C,N e P.....	33
3.6.5 Número de colmos e produtividade.....	33
3.7 Análise Estatísticas.....	34
3.7.1 Análises univariadas.....	34
3.7.2 Análises de correlação.....	34
4. RESULTADOS.....	35
4.1 Concentrações de carbono, nitrogênio, fósforo e silício em folhas e colmos de soqueira de cana-de-açúcar.....	35
4.2 Homeostase de carbono, nitrogênio, fósforo e silício em folhas e colmos de soqueira de cana-de-açúcar.....	38
4.3 Acúmulo de carbono, nitrogênio, fósforo e silício em folhas e colmos de soqueira de cana-de-açúcar.....	40
4.4 Eficiência de uso de carbono, nitrogênio e fósforo nas folhas e colmos de soqueira de cana-de-açúcar.....	41

4.5 Número de colmos, produção de biomassa e produtividade de soqueira de cana-de-açúcar.....	43
4.6 Correlação das variáveis de crescimento e nutricionais em soqueira de cana-de-açúcar.....	45
5. DISCUSSÃO.....	50
5.1 Impacto do déficit hídrico na homeostase C:N:P e na produtividade da soqueira da cana-de-açúcar	50
5.2 Papel do silício na atenuação dos danos do déficit hídrico na homeostase C:N:P e na produtividade da soqueira da cana-de-açúcar.....	52
6. CONCLUSÕES	54
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

RESUMO

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

A fertirrigação com silício (Si) tem se mostrado uma alternativa promissora para solucionar o déficit hídrico na cultura da cana-de-açúcar, permitindo o uso eficiente da água pelas plantas. Estudos indicam que os efeitos do Si na estequiometria do carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P) podem estar relacionados a esses benefícios, entretanto, as pesquisas restringiram-se em ambientes controlados, necessitando de novas verificações em condições de campo. Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar se a fertirrigação com Si modifica a estequiometria de C, N e P, com o intuito de aumentar a eficiência nutricional na produção de biomassa da cana-de-açúcar em condições de campo e reduzir os prejuízos na produtividade da cultura. Para alcançar esse objetivo, foi realizado um experimento em uma área de primeiro ano de soqueira, após o corte do primeiro ciclo de cultivo. O experimento foi realizado em delineamento experimental de blocos casualizados, seguindo um esquema fatorial 2×2 , testando dois níveis de capacidade de retenção de água no solo (restrição hídrica - 35% e ausência de restrição hídrica - 70%) e dois níveis de fornecimento de Si via fertirrigação (0 mM e 1,8 mM) com 5 repetições. Os resultados demonstraram que a aplicação de Si promoveu um aumento significativo no acúmulo de N, P e Si nas folhas e colmos da cana-de-açúcar, especialmente na condição de 70% de capacidade de retenção de água. Observou-se uma correlação negativa entre as concentrações de C e Si, sugerindo uma substituição estequiométrica entre esses elementos. Além disso, a fertirrigação com o Si resultou em uma melhoria na eficiência de uso de P e um aumento na produtividade da cana-de-açúcar em ambas as condições hídricas. Foi evidenciado que a presença de Si mitigou os efeitos do estresse por déficit hídrico promovendo um balanço mais eficiente entre C:N:P e elevando aumento do número de colmos e a produção de biomassa. Estes achados sugerem que a integração do Si no manejo agrícola pode ser uma prática essencial para garantir a sustentabilidade e a produtividade da cultura da cana-de-açúcar em cenários com ou sem escassez de recursos hídricos.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum* L.; déficit hídrico; estresse abiótico; eficiência de uso do C; elemento benéfico.

ABSTRACT

Impact of silicon on the C:N:P stoichiometry, on the nutritional efficiency and yield of the first ratoon crop of sugarcane under field conditions with different water regimes

Fertigation with silicon (Si) has emerged as a promising alternative to address water deficit in sugarcane cultivation, enabling efficient water use by plants. Studies suggest that the effects of Si on the stoichiometry of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) may be linked to these benefits; however, most research has been limited to controlled environments, necessitating further studies under field conditions. In this context, the objective of this research is to evaluate whether Si fertigation modifies the stoichiometry of C, N, and P with the aim of increasing nutrient efficiency in biomass production of sugarcane under field conditions and reducing the adverse effects on crop yield. To achieve this objective, an experiment was conducted in a first-year ratoon area, following the harvest of the first crop cycle. The experiment was carried out using a randomized block design, following a 2 x 2 factorial scheme, testing two levels of soil water retention capacity (water deficit - 35% and no water deficit - 70%) and two levels of Si supply via fertigation (0 mM and 1.8 mM) with 5 repetitions. The results demonstrated that Si application significantly increased the accumulation of N, P, and Si in sugarcane leaves and stalks, particularly under the 70% water retention capacity condition. A negative correlation was observed between C and Si concentrations, suggesting a stoichiometric substitution between these elements. Additionally, Si fertigation improved P use efficiency and increased sugarcane yield under both water conditions. It was evidenced that the presence of Si mitigated the effects of drought stress by promoting a more efficient balance between C:N:P and increasing the number of stems and biomass production. These findings suggest that integrating Si into agricultural management may be an essential practice to ensure the sustainability and yield of sugarcane crops in scenarios with or without water resource scarcity.

Keywords: *Saccharum officinarum* L.; water deficit; abiotic stress; C use efficiency; beneficial element.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é considerada uma espécie semiperene de alta produtividade devido a sua capacidade de rebrota da soqueira (Manhães et al., 2015). No entanto, nas últimas décadas, os efeitos das intensas mudanças climáticas vêm se tornando um grande desafio para os produtores, visto que essas mudanças estão ocasionando grandes perdas de produtividade das culturas agrícolas, dentre esses fatores destaca-se o déficit hídrico (Oliveira Filho et al., 2021).

O déficit hídrico na cultura da cana-de-açúcar causa problemas de rebrota e perfilhamento, consequentemente, reduzindo o desenvolvimento da cultura e a produção de biomassa (Marchiori et al., 2017; Souza et al., 2015). Considerando-se que esse fator limitante de grande impacto na produtividade da cana-de-açúcar, principalmente nas regiões tropicais do Brasil, favorecidas pelas condições climáticas encontradas, causa danos significativos às plantas, como, por exemplo, perdas no crescimento vegetal devido aos efeitos proporcionados pela diminuição da quantidade de água disponível (Teixeira et al., 2020).

O equilíbrio homeostático C, N e P também é afetado em condições de déficit hídrico, como consequência disso, diminui a eficiência do uso de nutrientes (Hoang et al., 2019). Para atenuar os problemas decorrentes dessas condições, é necessário que haja o desenvolvimento de estratégias que contornem essa situação, garantindo acima de tudo sustentabilidade agrícola.

Diante disso, o elemento benéfico Si é uma das principais alternativas que vem sendo objeto de estudos para comprovar sua eficácia na atenuação do

estresse hídrico nas lavouras (Costa et al.,2023). Dentre os benefícios da presença do Si na cultura estão os fatos do elemento não oferecer risco ao meio ambiente e apresentar um custo relativamente baixo em comparação aos nutrientes presentes na maioria dos fertilizantes convencionais, muitos estudos relataram o efeito do Si na redução das perdas de água e no prolongamento de resistência das plantas em relação às condições de déficit hídrico (Feng YQ, 2000; Bokor B et al., 2021; Costa et al.,2023).

Nesse cenário, como a cana-de-açúcar é um conhecido acumulador de Si, acumulando 380 Kg.ha^{-1} na parte aérea da planta (Samuels, 1969). Sua presença favorece o crescimento e a produção de biomassa (Frazão et al., 2020). Os recentes estudos desenvolvidos por Teixeira et al (2020) evidenciaram o papel do Si em modificar a estequiometria C, N e P, entretanto, limitaram em estudo em condições controlada de casa de vegetação, não sabendo que este efeito é estendido para soqueira da cana-de-açúcar, necessitando de novos estudos que comprovem ou refute este benefício do Si em condições de campo.

Portanto, pode-se constatar que para o uso de Si, é fundamental que haja pesquisas para avaliar se as hipóteses de uso do elemento em soqueiras de cana-de-açúcar sob condições de déficit hídrico reduzem os impactos nas modificações estequiométricas C, N e P, visto que há indícios de que esse elemento benéfico altere a estequiometria C:N:P, melhorando os processos nutricionais das plantas e garantindo redução na perda de produtividade.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do Si no equilíbrio homeostático do C, N e P na eficiência de uso destes nutrientes e na

produtividade da primeira soqueira de cana-de-açúcar em dois regimes hídricos (deficitário e adequado).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistema de cultivo e produção da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) consiste em uma espécie de ciclo semi-perene que demonstra elevada produtividade, em virtude do rebrotamento da soqueira (Manhães et al., 2015). Durante seu desenvolvimento, devido as condições climáticas, pode ser que a cana seja exposta por períodos de déficit hídrico, o que restringe a produção de biomassa e o crescimento da cultura (Marchiori et al., 2017), causado pela limitada capacidade de rebrota e perfilhamento (Souza et al., 2015).

Além disso, a cana-de-açúcar é uma planta com uma notável capacidade fotossintética, uma característica compartilhada com plantas que possuem o metabolismo C₄, permitindo com que a planta possua uma habilidade elevada de concentrar CO₂, reduzindo assim a fotorrespiração, o que resulta em altas taxas fotossintéticas, especialmente em condições de intensa radiação solar (Lucena et al., 2020).

Segundo a Companhia Nacional do Abastecimento (CONAB, 2020), o Brasil lidera o mercado de açúcar, bioenergia e derivados, sendo considerado o maior produtor mundial de cana-de-açúcar.

A produção brasileira de cana-de-açúcar na safra 2023/2024 apresentou uma queda em sua produção de 3,8% em relação ao ciclo anterior, produzindo em 685,86 milhões de toneladas (CONAB, 2024). As baixas quantidades de chuvas, combinadas com as altas temperaturas nas quais foram registradas na Região Centro-Sul, são os principais fatores que vêm causando perdas à produtividade, estimada em 79.079 kg ha⁻¹, 7,6% abaixo da obtida na safra anterior, que foi favorecida pelas boas condições climáticas (CONAB, 2024). Indicando que condições adversas são fatores decisivos no rendimento da cultura, especialmente as condições climáticas.

Na região Sudeste do Brasil se concentra a maior produção de cana-de-açúcar do país (64,6%) sua produção foi estimada em 442,74 milhões de toneladas, uma redução de 5,6% frente à safra 2023/2024, sendo observada a maior retração no estado de São Paulo, considerado o maior produtor nacional, com 28,32 milhões de toneladas, contraste com o resultado da safra passada (2022) quando não houve restrição hídrica (CONAB, 2024). Portanto, o déficit hídrico é um fator importante e responsável por limitar a produtividade da cultura.

A produção de cana-de-açúcar no Brasil é voltada para a fabricação de açúcar e etanol, mas também é usada para produzir outros itens, como doces, cachaça artesanal e forragens que servem de alimento para animais, sendo estas efetuadas por pequenos agricultores (Pereira et al., 2020).

Segundo Dinardo-Miranda et. al. (2008) o ambiente de produção de cana-de-açúcar é definido por interações complexas, condições físicas, químicas, hídricas, morfológicas e mineralógicas dos solos, essas características podem ser influenciadas pelo manejo adequado da camada arável. Segundo a mesma,

o ambiente é moldado pelas características da subsuperfície dos solos, bem como pelo clima regional, que engloba a precipitação pluviométrica, evaporação, radiação solar e temperatura.

O plantio da cana-de-açúcar é realizado em duas épocas, resultando na cana-planta de ano (12 meses) ou na cana planta de ano e meio (18 meses), entretanto após a realização do primeiro corte, o ciclo das mesmas é anual, recebendo a designação de cana soca (Barbosa, 2010).

A fenologia da cana-de-açúcar (primeira e segunda época) é composta por oito fases distintas: i) plantio do tolete, ii) brotação do tolete, iii) início do perfilhamento, iv) perfilhamento intenso, v) maturação, vi) colmos industrializáveis, vii) corte ou colheita e viii) brotação da soqueira (Segato et al., 2006).

O consumo anual de água pela cultura varia em torno de 1500 a 2500 mm, dependendo da região, do clima, das variedades e da classe de solo (Doorenbos e Kassam, 1994). Para contornar as condições naturais adversas e o aumento da qualidade e do rendimento da cana produzida, tem sido empregado estratégias que inclui desde práticas comuns, como a utilização de irrigação em locais que apresentam baixos índices pluviométricos, até o uso de avançadas inovações tecnológicas (Fries et al., 2020; Thomé; Vaz; Groff, 2017).

De acordo com a Agência Nacional das Águas, no Brasil, a área irrigada é dividida em dois segmentos, sendo um deles por meio da aplicação de águas captadas e o outro, advindo da aplicação de águas residuárias e vinhaça. Segundo a mesma, dos 2,1 bilhões de m³ de água utilizados nos canaviais brasileiros, 28% foram aplicados na forma de águas residuárias e vinhaça e 72%

na forma de águas captadas em mananciais. No entanto, a área irrigada com água captadas em mananciais no Brasil foi de 748,9 mil hectares, enquanto a área com aplicação de água residuárias e vinhaça foi de 2,9 milhões (ANA, 2019).

Diante do exposto, a cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância econômica no Brasil, sendo influenciada por diversos fatores como solo, clima e práticas de manejo (Dinardo-Miranda et al., 2008). O ciclo fenológico da cultura compreende várias etapas, desde o plantio até a colheita. A disponibilidade hídrica é crucial para o seu desenvolvimento, com uma parte significativa da água utilizada nos canaviais, sendo aplicada por meio de irrigação e fertirrigação. Para garantir uma produção sustentável e eficiente, é essencial compreender e gerenciar esses aspectos.

2.2 Déficit Hídrico

As mudanças climáticas, em especial a ocorrência de secas extremas em diferentes regiões de cultivo tem intensificado o déficit hídrico nas últimas décadas, resultando em danos substanciais ao desenvolvimento e à produção da cultura da cana-de-açúcar (Carneiro et al., 2020). As plantas em condições de campo estão constantemente expostas a estresses bióticos e abióticos, podendo sofrer interações negativas, afetando, significativamente, o rendimento da cultura (Marques, 2013).

Os principais fatores abióticos que limitam a produtividade em várias espécies, incluem deficiência hídrica, alagamento, temperaturas extremas e

salinidade. No entanto, o déficit hídrico é amplamente reconhecido como a principal causa da redução da produtividade agrícola em todo o mundo (Marques, 2013).

Desse modo, considerando a importância econômica que a cultura da cana-de-açúcar tem no Brasil e no mundo, principalmente à produção de açúcar, álcool e energia (CONAB, 2020). Diversos estudos estão surgindo a respeito do uso de recursos que minimizem o efeito do déficit hídrico na cultura, buscando manter sua produtividade.

O déficit hídrico pode ser entendido como todo conteúdo de água de uma célula ou tecido que está abaixo do conteúdo de água mais alto que é mostrado no estado de maior hidratação e acontece quando a perda de água supera a de absorção (Moreno-Fonseca, 2009).

O déficit hídrico causa um estresse nas plantas, afetando o potencial hídrico das folhas, alterando a atividade das trocas gasosas, uma vez que o conteúdo de água total de tecidos vegetais e células fica abaixo da máxima hidratação (Taiz et al., 2017). Sob este efeito, podem ser observado o fechamento de estômatos, que causa uma redução da transpiração e fotossíntese causada pela perda de pigmentos ligado a atividade fotossintética, além de comprometer processos de fixação e assimilação do CO₂ e a atividade de enzimas que combatem o estresse oxidativo (Lexas et al., 2012; Campelo et al., 2015).

Essas respostas induzem a redução no conteúdo de água celular, perturbando a homeostase celular. Em resposta, as plantas desenvolvem diferentes mecanismos adaptativos a condições estressantes, favorecendo a

manutenção homeostática e, conseqüentemente, o crescimento vegetativo (Asharaf e Harris, 2013; Campelo et al., 2015). Estratégias como uma maior absorção de água pelo sistema radicular, redução da condutância estomática, ajuste osmótico e alterações na elasticidade da parede celular permitem a manutenção da hidratação celular (Hessini et al. 2009; Marchiori et al. 2017; Nio et al. 2018).

Um dos mecanismos desenvolvidos pelas plantas que deve ser considerado para que haja uma melhora na eficiência do uso da água (Battie-Laclau et al. 2016), consiste no preciso controle da regulação estomática na qual evita a perda de água por transpiração (Miranda-Apodaca et al. 2018). Além disso, o controle da concentração de soluto celular é outra estratégia importante que pode aumentar a captação de água pelas células sob condições limitantes por conta da indução do ajuste osmótico (Zivcak et al. 2016).

O aumento da elasticidade da parede celular nas plantas contribui de forma eficiente na manutenção do turgor em condições de déficit hídrico (Saito e Terashima 2004), devido a maior elasticidade da parede celular estar correlacionada com aumentos de indução do ajuste osmótico, permitindo assim, com que a célula consiga manter a pressão de turgescência e continue a crescer mesmo com baixa disponibilidade de água (Lenz et al. 2006).

Nesse sentido, estudos que visem induzir esses mecanismos nas plantas, os quais permitem a manutenção do estado hídrico mesmo em condições de déficit hídrico são de fundamental importância para a produção agrícola.

2.3 Papel do Si nas plantas

As intempéries climáticas e diferenças hídricas nos solos, as irrigações de salvamento e fertirrigações são recursos que vêm sendo adotados para reduzir o impacto do déficit hídrico na produção (ANA, 2019). Juntamente a isso, alternativas como uso de Si podem ser aliadas na redução dos efeitos deletérios ocasionados pela restrição de água em plantas (Chen et al., 2018). Na cana-de-açúcar, a aplicação de Si pode amenizar estes efeitos (Teixeira et al., 2020). O Si é um elemento benéfico que visa a redução do estresse tendo despertado interesse entre os pesquisadores nas últimas décadas, pois pode promover a produção agrícola mesmo diante da presença de estresse hídrico nos cultivos (Prado, 2023).

Estudos demonstram que plantas sob estresse desenvolvem estratégias para promover nova homeostase estequiométrica, equilibrando seu metabolismo, sendo descoberto então um efeito do Si em alterações nutricionais na planta, induzindo uma nova homeostase, melhorando a eficiência na utilização de nutrientes e constituindo um componente importante na mitigação do déficit hídrico, uma vez que esse estresse causa danos nutricionais nas plantas (Prado e Silva, 2017).

As plantas podem ser consideradas como acumuladoras e não acumuladoras de Si, sendo as primeiras capazes de apresentarem concentrações superiores à 10 g kg^{-1} e, as segundas, concentrações até 5 g kg^{-1} , e, nesse caso, a cana-de-açúcar faz parte do grupo das plantas acumuladoras (Cornelis et al., 2011).

Além disso, a absorção do Si ocorre por meio de difusão, com passagem do ácido monossilícico do meio mais concentrado para o menos concentrado, sendo que a absorção realizada, de maneira geral, por diversas espécies vegetais, varia de 2 a 90 kg ha⁻¹ (Cornelis et al., 2011).

Segundo Faria (2000), as plantas adubadas com Si tornam-se mais eficientes na capacidade de absorção de luz solar, com isso, aumentando a atividade fotossintética, podendo, também, aumentar a resistência das plantas ao estresse hídrico.

Embora o Si não seja considerado um nutriente, o mesmo é um dos elementos mais absorvidos pela cana-de-açúcar, sendo antecedido por N, K, Ca e Mg (Datnoff et al., 2001). Nas folhas de cana-de-açúcar ricas em Si, esse elemento preencheria os espaços interfibrilares, reduzindo o movimento de água através da parede celular, o que causaria economia de água pela redução da taxa transpiratória (Datnoff et al., 2001).

Já a acumulação de Si nos órgãos de transpiração como por exemplo, nas folhas, normalmente é maior se comparado em órgãos absorptivos, como as raízes, designando com que a deposição seja influenciada pelo fluxo progressivo do fluxo de evapotranspiração (Mandlik et al, 2020).

Além disso, o Si desempenha importante papel na formação dos fitólitos, os quais são partículas de sílica hidratada que se formam durante o crescimento da planta após a absorção do ácido monossilícico pelas raízes, sendo em seguida, depositada nos espaços inter e intracelulares (Luz et al., 2015). Existem pelo menos quatro possibilidades em relação a função da produção de fitólitos: i) suporte aos órgãos e estruturas da planta, ii) proteger a planta de parasitas e

herbívoras iii) suporte mecânico para as células e iv) de neutralizar cátions e ânions nocivos ao desenvolvimento das plantas (Madella, 2009).

Os fitólitos são depositados na parede celular ocupando espaços de estruturas ricas de carbono, como hemicelulose, celulose, ligninas e outros compostos orgânicos (Costa et al.,2024). A deposição de fitólitos modifica o uso de carbono na parede celular, aumentando a eficiência de uso de C, portanto, demandando menor quantidade de C para síntese da parede celular e diminuindo a concentração de C nos tecidos vegetais (Costa et al.,2024). De forma complementar, a menor demanda de estruturas ricas em C na parede celular provoca economia de energia metabólica nas plantas, pois estas estruturas ricas em carbono demanda alto custo energético para a sua síntese, enquanto a formação dos fitólitos apresenta baixo custo energético (Costa et al., 2024), podendo direcionar o saldo energético para outras atividades metabólicas nas plantas.

Adicionalmente, esta modificação da concentração de C na parede celular provoca mudança na relação estequiométrica C:N:P, também é resultado do efeito do Si nas concentrações de N e P (Costa et al.,2022; Costa et al.,2023). De acordo com a literatura, o Si pode influenciar esses nutrientes por meio de interações complexas dentro das células vegetais, como por exemplo, auxiliando na absorção dos nutrientes, além de melhorar a eficiência fotossintética (Pontigo et al., 2015). Contudo, foi evidenciado que, na cultura de cana-de-açúcar, o Si pode regular a fotossíntese e a transpiração, fazendo assim com que haja a absorção de N (Frazão et al.,2020).

O Si desempenha três papéis na proteção das plantas: bioquímico, fisiológico e físico (Farooq e Dietz, 2015). Em termos bioquímicos e fisiológicos, o acúmulo de Si aumenta a tolerância a seca, realizando ajustes osmóticos e modificando atributos das trocas gasosas, como a assimilação de CO₂ e as taxas de transpiração, que mantem o potencial hídrico foliar, além de reduzir o estresse oxidativo, promovendo alterações nos osmólitos, fitormônios e na expressão de genes (Farooq e Dietz, 2015).

Do ponto de vista físico, o Si contribui para melhorar a arquitetura foliar ao reduzir a abertura do ângulo das folhas, deixando-as mais eretas, o que reduz o autossombreamento e deposição de Si no apoplasto das folhas, o que proporciona maior resistência a danos mecânicos (Ma et al., 2011). Há estudos envolvendo o Si para mitigação do déficit hídrico em cana-de-açúcar que direcionam os seus efeitos fisiológicos e bioquímicos (Bezerra et al., 2019; de Camargo et al., 2019; Teixeira et al., 2020A; Verma et al., 2019), agindo na preservação de pigmentos fotossintéticos (Bokhtiar et al., 2012; Verma et al., 2019), na manutenção do potencial hídrico foliar (Amin et al., 2014; Bezerra et al., 2019) e no aumento da eficiência de uso da água (Ming et al., 2012), desse modo, a planta consegue amenizar os danos causados pelo déficit hídrico.

Dessa forma, o uso estratégico de Si na produção de cana-de-açúcar tem sido reconhecido por sua capacidade de mitigar os efeitos do déficit hídrico. Segundo Costa et al. (2024) e Costa et al. (2023), os estudos demonstraram uma grande melhora na eficiência e absorção de nutrientes, promovendo ajustes fisiológicos e aumentando a resistência ao estresse oxidativo. Além disso, ressaltamos a capacidade do Si na formação de fitólitos na parede celular, não

apenas fortalecendo estruturalmente as plantas, mas também otimizando o uso de C na parede celular, influenciando a relação estequiométrica dos nutrientes e contribuindo para garantir a produtividade mesmo em condições climáticas adversas (Costa et al., 2024).

2.4 Impacto do déficit hídrico no equilíbrio homeostático C:N:P e sua atenuação pelo silício

A homeostase C:N:P é afetado por diversos estresses ambientais, inclusive o de déficit hídrico, fazendo assim com que haja alterações bioquímicas e fisiológicas na maioria das plantas cultivadas proporcionando uma redução na produtividade dessas plantas (Costa et al., 2024). Diante disso, Costa et al (2024), afirma que são necessárias estratégias que visam mitigar os danos induzidos pelo estresse, promovendo o equilíbrio nutricional dessas plantas, e o Si tem apresentado resultados promissores nesse sentido já que induz alterações na homeostase C:N:P nas plantas.

Segundo Costa et al. (2024) as mudanças na estequiometria C:N:P modificam o metabolismo de nutrientes nas quais estão envolvidos na síntese de macromoléculas necessárias para o funcionamento ideal da planta. Ainda segundo estes autores, o C serve como base estrutural orgânica para todas as macromoléculas vegetais, o N é o principal componente de aminoácidos, proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucleicos, vitaminas, lipoproteínas e clorofila, e o P contribui para as estruturas celulares, sendo constituintes de

ésteres fosfóricos, fosfolipídios, nucleotídeos e ácido fítico, além de aumentarem a transpiração e a assimilação de carbono e nitrogênio.

Um parâmetro importante nos estudos estequiométricos nutricionais está relacionado com a produção de biomassa devido a maior dependência da disponibilidade de nutrientes nos tecidos das plantas (Güsewell, 2004). Existem pesquisas focadas especialmente em N e P, sobre a eficiência de uso de nutrientes, sendo que o Si é considerado um mecanismo de absorção e transporte de determinados elementos (Ye et al., 2014; Ma e Yamaji, 2006).

A absorção do Si, na cana de açúcar, ocorre de maneira passiva, ou seja, sem o gasto de energia, sendo potencializado pelo fluxo massal da água (Lana et al., 2003). Já o seu transporte, acontece pelo xilema, sendo alocado na parede celular, na forma de sílica amorfa hidratada, ou opala biogênica ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), proporcionando elasticidade e rigidez aos tecidos (Moreira et al., 2010).

Segundo Xu et al. (2020) também pode ter grande influência no desempenho das plantas, sendo isso demonstrado em diversos estudos evidenciando o papel do Si causando efeitos positivos na produção de biomassa em plantas gramíneas. Além disso, Frazão et al. (2020) em estudo com a cultura da cana-de-açúcar também observaram que a aplicação de Si alterou a estequiometria do C favorecendo o crescimento da planta sob restrição hídrica.

O fornecimento de Si às plantas pode atenuar o estresse abiótico e mitigar os danos às plantas, melhorando a homeostase estequiométrica de C:N:P pelo aumento da absorção desses nutrientes, ao mesmo tempo em que reduz o estresse oxidativo, beneficiando o metabolismo e auxiliando a assimilação de C no qual induziria em um aumento na eficiência do uso de nutrientes no

metabolismo das plantas, melhorando assim o rendimento das culturas (Costa et al., 2024).

Além disso, de acordo com Costa et al. (2024), a adição de Si via fertirrigação aumentou o acúmulo de Si e P nas plantas, ao mesmo tempo que diminuiu as concentrações de C e N. De acordo com Yan et al. (2018), o efeito benéfico do Si em relação a sua capacidade de modificação estequiométrica em plantas sob condições de estresses abióticos se deve ao fato de que a diminuição da concentração de C ocorre devido a substituição por Si em sítios de ligação entre os componentes da parede celular resguardando o mesmo para ser utilizado em outras sínteses orgânicas vitais (Neu et al. 2017).

Estudos realizados por Costa et al. (2023) analisando o efeito do uso de Si na soqueira da cana-de-açúcar com irrigações deficientes e adequadas em diferentes solos tropicais, concluíram que a irrigação deficiente sem fornecimento de Si causa danos biológicos. Entretanto, o cultivo da cultura sob irrigação deficiente pode ser realizado juntamente com o uso da fertirrigação com o Si, visto que o mesmo pode mitigar perdas, já que a aplicação de Si aumentou não apenas a sua concentração e o seu acúmulo, mas também de C, N e P, sua eficiência de uso e reduziu os danos biológicos causados pelo déficit hídrico por conta da modificação do equilíbrio homeostático C:N:P, garantindo assim, a sustentabilidade da produção de biomassa de cana-de-açúcar nesses tipos de solos.

Os resultados demonstram a importância da homeostase C, N e P para que haja uma estabilização e otimização do metabolismo desses nutrientes e, desse modo permitindo com que haja um aumento na capacidade das plantas

em converter nutrientes em biomassa (Prado,2021). Os estudos estequiométricos C:N:P avançaram na última década em plantas de cana-de-açúcar, entretanto, os estudos restringiram em casa de vegetação, não compreendendo que os benefícios do Si é extrapolado em condições de campo, necessitando de novos estudos avaliados em condições de campo.

3. METODOLOGIA

3.1 Área experimental e condições climáticas

O trabalho foi realizado em uma área com cultivo da primeira soqueira da cana-de-açúcar em condições de campo em um Latossolo Vermelho Eutroférico na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV) da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Jaboticabal, São Paulo, Brasil. A condição climática da região é classificada na categoria Aw tropical (clima tropical com inverno seco), apresentando uma pluviosidade média de 1.425 mm ano⁻¹ e uma temperatura média anual de 21,7 °C. Durante o experimento, foram monitoradas as variáveis agrometeorológicas com o auxílio da Estação Agroclimatológica do Departamento de Ciências Exatas da FCAV (Figura 1 e Figura 2).

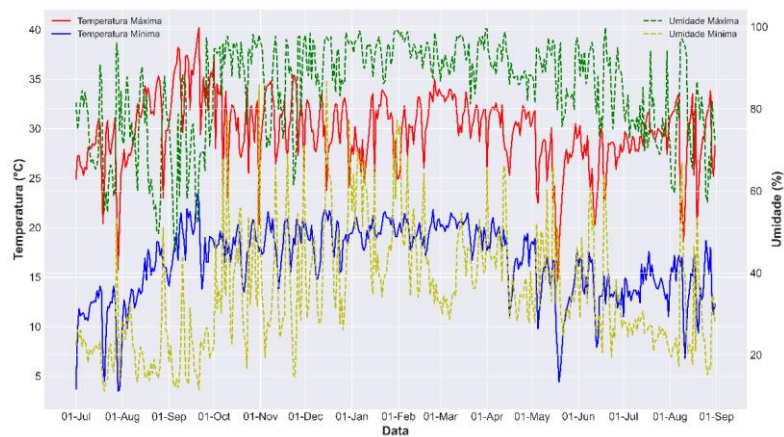


Figura 1. Temperatura e umidade relativa do ar da área experimental durante a condução do estudo. Fonte: Estação Agroclimatológica Departamento de Ciências Exatas da FCAV/UNESP.

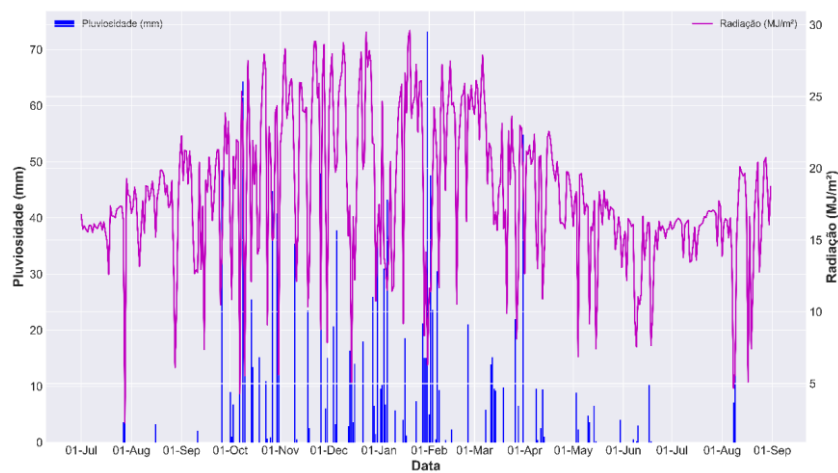


Figura 2. Pluviosidade e radiação solar global da área experimental durante a condução do estudo. Fonte: Estação Agroclimatológica Departamento de Ciências Exatas da FCAV/UNESP.

A área experimental apresenta classificação de solo de Latossolo Vermelho Eutroférico, com textura argilosa. Para caracterização dos atributos químicos, físicos e granulométrico foi realizada amostragem nas camadas de superficial (0.0 – 0.2 m) e subsuperficial (0.2 – 0.4 m). Os atributos químicos foram determinados seguindo os métodos descritos por Raji et al. (2001), e as físicas e granulométricas foram realizadas de acordo com o manual de métodos de análise de solo da Embrapa (Donagema et al., 2011) (Tabela 1).

Tabela 1. Atributos químicos e granulométrica da área experimental antes da instalação do experimento

Camada	pH	MO	P	S	Ca	Mg	K	Al	H+Al	Si	Arg	S	A
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³		----- mmol _c dm ⁻³ -----					mg kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
0 – 20	6,1	22	57	6	39	16	3,7	0	21	10	603	250	147
20 – 40	6,4	17	31	7	36	15	3,6	0	18	9	607	257	136

pH - em CaCl₂ por potenciometria; H+Al - em tampão SMP por potenciometria; - MO - por espectrofotometria; P - em resina por espectrofotometria; S - por turbidimetria; Ca - por espectrometria de absorção atômica; Mg - por espectrometria de absorção atômica; Na - por espectrometria de absorção atômica; K - por espectrometria de absorção atômica; Si - em cloreto de cálcio a 0,01 mol; Al - em KCl por titulometria. Arg: Argila; S: Silte; A: areia.

3.2 Delineamento experimental

O experimento foi instalado na cana-planta em fileiras (Slip-block) que separam os tratamentos de acordo com a capacidade de retenção de água do solo (CRA) iguais a: 70% (regime hídrico adequado) e 35% (regime hídrico deficitário); e duas condições de fornecimento de Si: ausência (0 mmol) e presença (1,8 mmol), dispostos em blocos ao acaso com cinco repetições.

Utilizaram-se mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* spp.), variedade RB 966928. As mudas foram distribuídas a cada 0,65m no sulco de plantio e com 1,5m entre linhas tendo a parcela 5,2m², após 12 meses de cultivo realizou-se o primeiro corte, caracterizando a cana planta, posteriormente, iniciou-se o segundo ciclo de cultivo (1ª soqueira). O sistema de irrigação utilizado foi por gotejamento subsuperficial, tendo um gotejador a cada 0,5 cm. Para esse estudo, foi avaliado a primeira soqueira, sendo aplicado os mesmos tratamentos realizados na cana-planta indicados anteriormente.

3.3 Sistema e manejo de irrigação

O sistema de irrigação utilizado foi por gotejamento subsuperficial (Tipo Topdrip 15 mil), tendo um gotejador a cada 0,5 cm, com vazão de 1 L m⁻¹ h⁻¹ e pressão de serviço de 1, 20 KPa. Os tubos gotejadores foram soterrados (0.3 m) embaixo da linha de plantio com comprimentos de 20 m. A uniformidade do sistema de irrigação foi calculada pelo coeficiente de Christiansen, apresentando uniformidade de 93,23%, utilizando os métodos descritos por Keller e Karmeli (1975).

A água utilizada na irrigação foi captada em lençóis freáticos subterrâneo, filtrando com discos de 125 mesh e depositando em reservatório (17,5 m³) próximo ao experimento (120 metros). O sistema de irrigação utilizava uma motobomba centrífuga (1 cv), um monômetro e um sistema de aplicação de fertilizantes por sucção direta.

O manejo da irrigação foi realizado pela capacidade de retenção de água no solo (CRA) à 35% e 70%, representando o regime deficitário e adequado, respectivamente. Foi realizado de coleta de amostras indeformadas do solo e foi determinado a curva de retenção de água construída por meio de testes em mesa de tensão e câmara de pressão de Richards (KLUTE, 1986) (Tabela 2). A lâmina de irrigação foi ajustada para manter os níveis de CRA, onde foi ajustado por meio dos balanços hídricos diários, que levaram em consideração o excesso ou o déficit de água no solo em relação à capacidade de campo. A ET_c da cultura foi calculada com base no balanço hídrico, somando-se a água de irrigação, a precipitação e o uso da água do solo ao longo do período de crescimento.

O coeficiente de cultivo foi determinado com base nos estádios fenológicos da cultura da cana-de-açúcar, sendo: fase de estabelecimento no campo (0,23; 0,40; 0,50) de 0 a 60 dias após o transplante (DAT); perfilhamento (0,60; 0,80; 1,03) de 61 a 180 DAT; crescimento dos colmos (1,03) de 181 a 280 DAT; e maturação (1,03 - 0,75) de 281 a 335 DAT (Allen et al., 1998; Gonçalves e Miranda, 2014). Após 335 DAT, a irrigação foi interrompida para favorecer a concentração de sacarose nos colmos.

3.4 Manejo da adubação

A partir da determinação dos atributos químicos do solo foi realizado a recomendação da adubação de N, P, K e micronutrientes para a cultura da cana-de-açúcar conforme indicação de QUAGGIO et al. (2022). A adubação de N foi realizada com 160 kg ha⁻¹ de N utilizando a fonte de ureia (45% de N) e fosfato

monoamônico (12% de N), a adubação fosfatada foi realizado com 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ com fosfato monoamônico (50% de P₂O₅) e a adubação potássica foi realizado com 200 kg ha⁻¹ de K₂O com cloreto de potássio (60% de K₂O). Após 15 DAT, foi realizado a fertirrigação com 5 mg dm⁻³ de Zn, na forma de sulfato de zinco e 2 mg dm⁻³ de B na forma de ácido bórico.

3.5 Manejo do silício

Os tratamentos com o Si indicados anteriormente (1,8 mmol) foram aplicados novamente na primeira soqueira na forma de silicato de sódio neutro (SNaN) (8,9% de Na₂O; 28% de SiO₂ e densidade (g/l) de 1,4) da Diatom Mineração®, com pH ajustado para 5,5 a 6,5, sendo corrigido com solução de hidróxido de sódio (NaOH) (1 mmol) e ácido clorídrico (HCl) (1 mmol). No total, cinco aplicações de Si foram aplicadas em toda lavoura ao longo do cultivo via fertirrigação, sendo duas aplicações na fase de perfilhamento, aos 30 e 75 dias após o transplântio (DAT) e três na fase de desenvolvimento de colmos, aos 115, 145, 175 DAT.

3.6 Avaliações experimentais

3.6.1 Análise de produção de massa seca e produtividade

Ao final do primeiro ciclo da soqueira, foram coletadas oito plantas em cada parcela experimental a uma distância de 10 cm da superfície do solo, em seguida as mesmas foram divididas em folhas e colmos, sendo o colmo pesado em balança digital e, conseqüentemente, foi estimada a produtividade.

3.6.2 Determinação das concentrações de C, N e P e Si

As concentrações de C e N foram determinadas em combustão a seca (1000 °C) com o analisador elementar (LECO truspec CHNS), ajustado de acordo com o padrão LECO 502-278 (C = 45,00%). A concentração de P foi determinada por meio da digestão nítrico-perclórica e pela leitura em espectrofotômetro. A concentração de Si foi determinada a partir de digestão alcalina (H₂O₂ e NaOH) e leitura da reação colorimétrica com molibdato de amônio com auxílio do espectrofotômetro.

3.6.3 Razões estequiométricas e acúmulo de C, N, P e Si

As razões estequiométricas foram calculadas a partir das razões das concentrações de C, N, P e Si, resultando em razões C:N, C:P, N:P e C:Si. Enquanto o acúmulo de C, N, P e Si nas folhas e colmo, foi calculado pelo produto da concentração e da massa seca do órgão em estudo.

3.6.4 Eficiência dos usos de C, N e P

A eficiência de utilização de C, N e P nas folhas e no colmo foi estimada pelo quociente do quadrado da matéria seca e acúmulo do nutriente (g do nutriente acumulado).

3.6.5 Números de colmos e produtividade

O número de colmos por touceira foi determinado manualmente, contabilizando-se a quantidade de colmos presentes em cada touceira durante a fase de colheita. Para medir a produtividade, as plantas foram cortadas a 10 cm do solo, colhendo-se 2,6 metros lineares de cana-de-açúcar (correspondente às quatro plantas úteis do centro de cada parcela experimental). Em seguida, as

plantas foram pesadas em uma balança digital para estimar a produtividade em toneladas por hectare ($t\ ha^{-1}$).

3.7 Análise Estatísticas

3.7.1 Análises univariadas

Os dados foram testados quanto à normalidade de Shapiro-Wilk e homogeneidade de Levene, seguidos de análise de variância ($p < 0,05$) e, quando significativo, teste de comparação de médias de Tukey ($p < 0,05$). Para a análise dos dados, utilizamos técnicas de estatística descritiva e inferencial com o auxílio das bibliotecas pandas, seaborn, e matplotlib no ambiente Python (Version 3.9).

3.7.2 Análises de correlação

Para entender melhor como diferentes fatores influenciam o crescimento e a nutrição das soqueiras de cana-de-açúcar, realizamos uma análise de correlação de Pearson. A correlação de Pearson foi ajustada para mensurar a força e a direção das relações entre essas variáveis, com valores variando de -1 (correlação negativa forte) a 1 (correlação positiva forte), enquanto valores próximos de 0 indicam pouca ou nenhuma correlação. Para visualizar essas

correlações, foi criado um gráfico de mapa de calor (*heatmap*) utilizando a biblioteca *seaborn* do Python (Version 3.9).

4. RESULTADOS

4.1 Concentrações de carbono, nitrogênio, fósforo e silício em folhas e colmos de soqueira de cana-de-açúcar

A diminuição da capacidade de retenção de água do solo (CRA) de 70% para 35%, sem a aplicação de fertirrigação com silício (Si), resultou em um aumento na concentração de carbono (C) nas folhas (Figura 3a). No entanto, a fertirrigação com Si diminuiu a concentração de C nas folhas, independentemente do nível de CRA (35% e 70%) (Figura 3a). De forma similar, a diminuição da CRA de 70% para 35%, sem Si, diminuiu os níveis de C nos colmos (Figura 3b), enquanto a aplicação de Si provocou uma diminuição na concentração de C nos colmos em ambas as condições hídricas (Figura 3b).

Quanto ao nitrogênio (N), a redução da CRA de 70% para 35%, sem fertirrigação com Si, diminuiu a concentração de N nas folhas (Figura 3c). Em contraste, a aplicação de Si aumentou significativamente a concentração de N nas folhas, tanto em 35% quanto em 70% de CRA (Figura 3c). Nos colmos, a CRA diminuída de 70% para 35%, sem Si, aumentou a concentração de N (Figura 3d), enquanto a fertirrigação com Si elevou ainda mais os níveis de N nas duas condições hídricas avaliadas (Figura 3d).

Em relação ao fósforo (P), a diminuição da CRA de 70% para 35%, na ausência de Si, elevou os níveis de P nas folhas (Figura 3e). A fertirrigação com Si intensificou esse aumento em ambas as condições hídricas (Figura 3e). Nos colmos, a diminuição da CRA de 70% para 35% também aumentou a concentração de P (Figura 3f), enquanto a fertirrigação com Si diminuiu o teor de P nos colmos a 35% de CRA e aumentou a 70% de CRA (Figura 3f).

Por fim, a diminuição da CRA de 70% para 35%, sem aplicação de Si, resultou em uma diminuição na concentração de Si nas folhas (Figura 3g), ao passo que a fertirrigação com Si promoveu um aumento significativo dos níveis de Si nas folhas em ambas as condições hídricas (Figura 3g). Nos colmos, a diminuição da CRA de 70% para 35%, sem Si, não alterou os níveis de Si (Figura 3h), mas a aplicação de Si aumentou sua concentração em ambas as condições hídricas (Figura 3h).

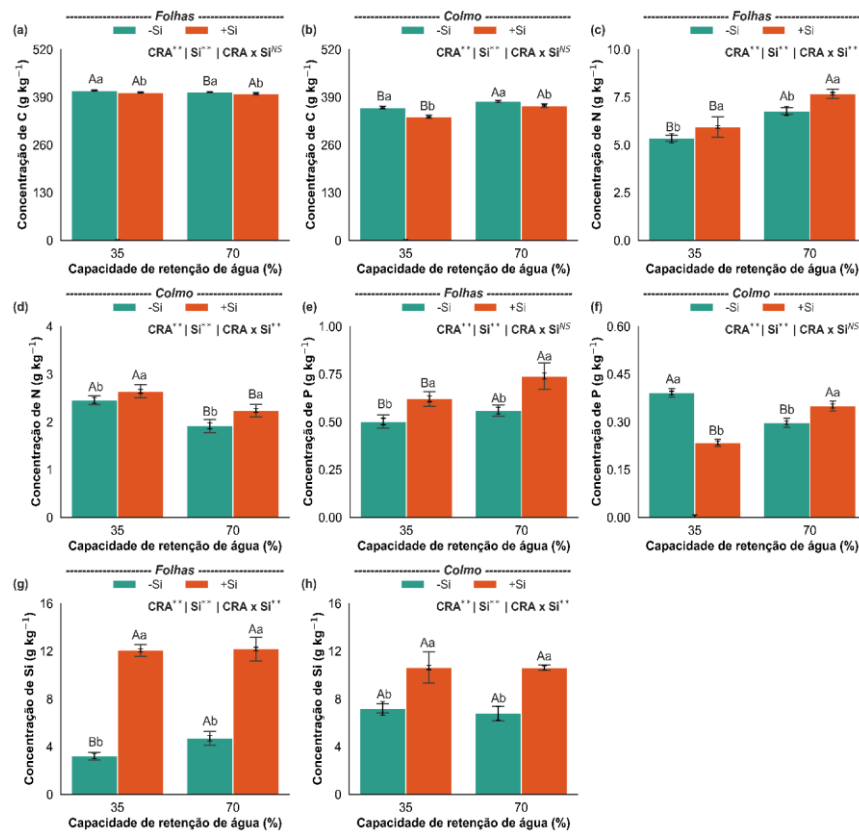


Figura 3 – Concentração de carbono (a,b), nitrogênio (c,d), fósforo (e,f) e silício (g,h) em folhas e colmo em soqueira de cana-de-açúcar em duas condições hídricas (35% e 70% CRA) combinado com ausência (-Si) e presença de Si (+Si). Letras maiúsculas indicam diferenças estatísticas significativas entre as condições hídricas, enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre os níveis de suprimento de Si. NS, * e **: Indicam, respectivamente, diferença não significativa ao nível de 0,05, significativa ao nível de 0,05 e significativa ao nível de 0,01 pelo teste F.

4.2 Homeostase de carbono, nitrogênio, fósforo e silício em folhas e colmos de soqueira de cana-de-açúcar

A diminuição da CRA de 70% para 35%, sem fertirrigação com Si, aumentou a razão estequiométrica C:N nas folhas (Figura 4a). Em contrapartida, a aplicação de Si reduziu essa razão nas folhas, independentemente da condição hídrica (35% ou 70% da CRA) (Figura 4a). Nos colmos, a diminuição da CRA de 70% para 35%, sem Si, resultou em uma queda na razão C:N (Figura 4b), e a fertirrigação com Si também diminuiu essa razão, tanto a 35% quanto a 70% da CRA (Figura 4b).

A diminuição da CRA de 70% para 35%, sem a presença de Si, elevou a razão estequiométrica C:P nas folhas (Figura 4c), enquanto a fertirrigação com Si teve o efeito oposto, diminuindo essa razão em ambas as condições hídricas (Figura 4c). Nos colmos, a CRA diminuída de 70% para 35% diminuiu a homeostase C:P (Figura 4d), ao passo que a fertirrigação com Si aumentou essa homeostase em 35% de CRA e elevou a razão C:P na condição de 70% de CRA (Figura 4d).

No caso da razão estequiométrica C:Si, a diminuição da CRA de 70% para 35%, sem Si, levou a um aumento dessa razão nas folhas (Figura 4e). No entanto, a fertirrigação com Si diminuiu significativamente a razão C:Si nas folhas, independentemente da condição hídrica (Figura 4e). Nos colmos, a redução da CRA de 70% para 35%, sem Si, não alterou a razão C:Si (Figura 4f), mas a fertirrigação com Si diminuiu a homeostase C:Si nos colmos em ambas as condições de CRA (Figura 4f).

Por fim, a diminuição da CRA de 70% para 35%, na ausência de Si, diminuiu a razão estequiométrica N:P nas folhas (Figura 4g). Da mesma forma, a fertirrigação com Si também diminuiu essa razão nas folhas em ambas as condições hídricas (Figura 4g). Nos colmos, a diminuição da CRA de 70% para 35% não provocou mudanças significativas na razão N:P (Figura 4h), enquanto a fertirrigação com Si aumentou essa razão a 35% de CRA, sem respostas significativas a 70% de CRA (Figura 4h).

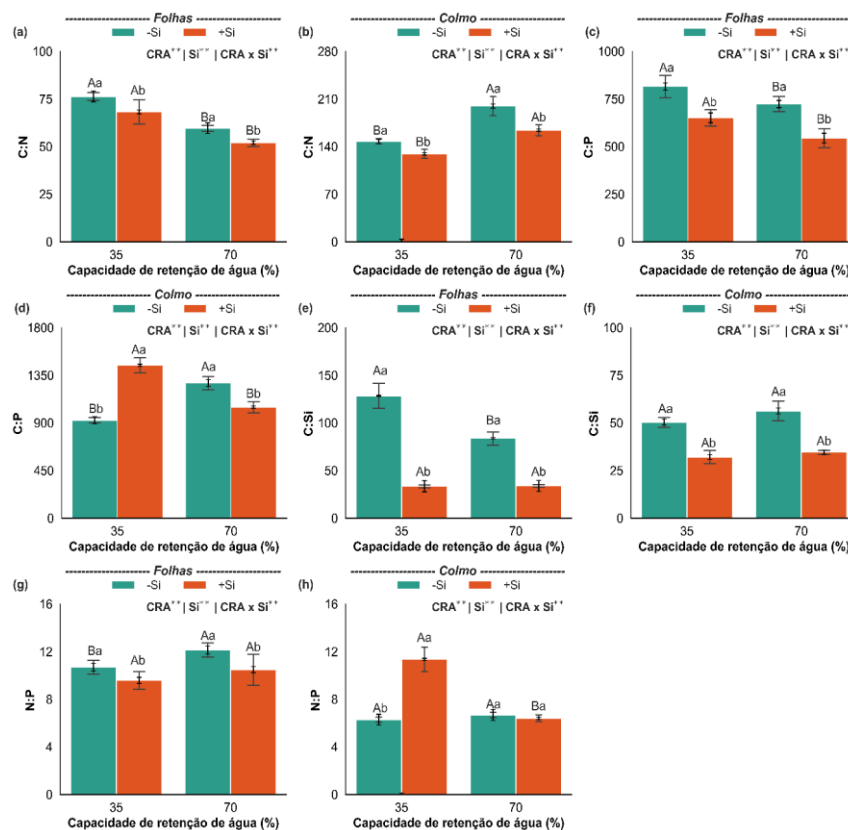


Figura 4 – Homeostase C:N (a,b), C:P (c,d), C:Si (e,f) e N:P (g,h) em folhas e colmo em soqueira de cana-de-açúcar em duas condições hídricas (35% e 70% CRA) combinado com ausência (-Si) e presença de Si (+Si). Letras maiúsculas indicam diferenças estatísticas entre as condições hídricas, enquanto letras

minúsculas indicam diferenças entre os níveis de suprimento de Si. NS, * e **: Indicam, respectivamente, diferença não significativa ao nível de 0,05, significativa ao nível de 0.05 e significativa ao nível de 0.01 pelo teste F.

4.3 Acúmulo de carbono, nitrogênio, fósforo e silício em folhas e colmos de soqueira de cana-de-açúcar

A redução da CRA de 70% para 35%, sem a aplicação de Si, resultou em uma diminuição no acúmulo de C nas folhas e nos colmos (Figuras 5a e 5b). Por outro lado, a fertirrigação com Si não alterou significativamente o acúmulo de C sob a condição de 35% de CRA, mas houve um aumento desse acúmulo nas folhas e colmos na condição de 70% de CRA (Figuras 5a e 5b).

Em relação ao N, a redução da CRA de 70% para 35%, sem Si, também diminuiu o acúmulo de N nas folhas (Figura 5c). Entretanto, a fertirrigação com Si promoveu um aumento expressivo no acúmulo de N nas folhas em ambas as condições hídricas (35% e 70% de CRA) (Figura 5c). Nos colmos, a diminuição da CRA de 70% para 35%, sem Si, não afetou o acúmulo de N (Figura 5d), enquanto a fertirrigação com Si aumentou os níveis de N nos colmos sob as duas condições hídricas (Figura 5d).

Quanto ao P, a diminuição da CRA para 35%, sem a aplicação de Si, diminuiu o acúmulo de P nas folhas (Figura 5e), enquanto a fertirrigação com Si elevou o acúmulo de P nas folhas em ambas as condições de CRA (35% e 70%) (Figura 5e). Nos colmos, a diminuição da CRA de 70% para 35%, sem Si, não gerou diferenças significativas no acúmulo de P (Figura 5f). No entanto, com a fertirrigação com Si, observou-se uma diminuição no acúmulo de P na condição de 35% de CRA e um aumento na condição de 70% de CRA (Figura 5f).

Por fim, a diminuição da CRA de 70% para 35%, sem a presença de Si, diminuiu o acúmulo de Si nas folhas e nos colmos (Figuras 5g e 5h). Em contrapartida, a fertirrigação com Si promoveu um aumento significativo no acúmulo de Si nas folhas e colmos em ambas as condições hídricas (Figuras 5g e 5h).

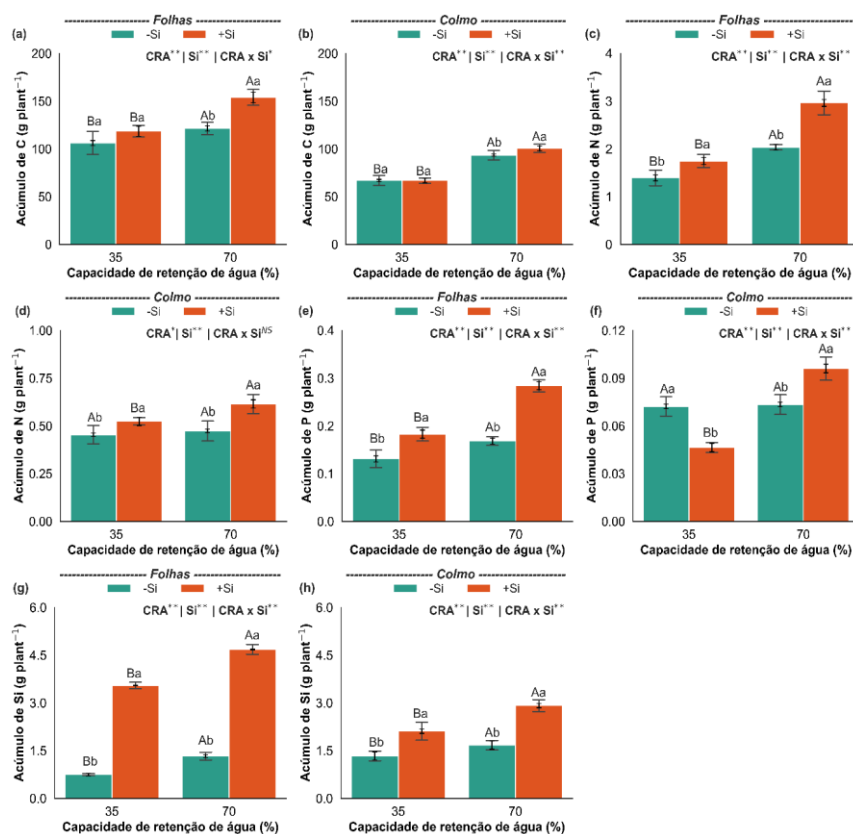


Figura 5 – Acúmulo de C (a,b), N (c,d), P (e,f) e Si (g,h) em folhas e colmo em soqueira de cana-de-açúcar em duas condições hídricas (35% e 70% CRA) combinado com ausência (-Si) e presença de Si (+Si). Letras maiúsculas indicam diferenças estatísticas significativas entre as condições hídricas, enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre os níveis de suprimento de Si. NS, * e **:

Indicam, respectivamente diferença não significativa, significativa ao nível de 0,05 e altamente significativa ao nível de 0,01 no teste F.

4.4 Eficiência de uso de carbono, nitrogênio e fósforo nas folhas e colmos de soqueira de cana-de-açúcar

A diminuição da CRA de 70% para 35%, sem a aplicação de Si, resultou em uma diminuição na eficiência de uso de C nas folhas (Figura 6a). A fertirrigação com Si não alterou essa eficiência a 35% de CRA, mas aumentou significativamente a eficiência de uso de C nas folhas na condição de 70% de CRA (Figura 6a). De forma semelhante, a diminuição da CRA de 70% para 35%, sem Si, diminuiu a eficiência de uso de C nos colmos (Figura 6b), enquanto a fertirrigação com Si aumentou essa eficiência em ambas as condições hídricas (Figura 6b).

Quanto ao N, a CRA diminuída de 70% para 35%, sem Si, não afetou a eficiência de uso de N nas folhas, e a fertirrigação com Si também não apresentou efeito significativo em nenhuma das condições hídricas (35% e 70% da CRA) (Figura 6c). Nos colmos, a diminuição da CRA diminuiu a eficiência de uso de N (Figura 6d), mas a aplicação de Si novamente não mostrou resultados significativos em ambas as condições (Figura 6d).

Para o P, não houve diferenças significativas na eficiência de uso de P nas folhas com a CRA diminuída ou com a fertirrigação com Si, independentemente da condição hídrica (Figura 6e). No entanto, nos colmos, a diminuição da CRA de 70% para 35%, sem Si, diminuiu a eficiência de uso de P

(Figura 6f), enquanto a fertirrigação com Si aumentou essa eficiência a 35% de CRA e não apresentou efeito significativo a 70% de CRA (Figura 6f).

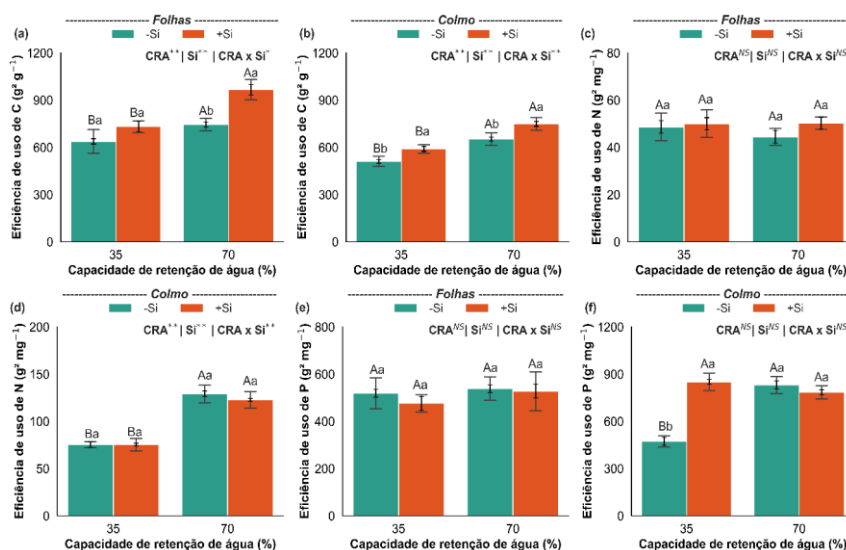


Figura 6 – Eficiência de uso de C (a,b), de N (c,d) e de P (e,f) em folhas e colmo em soqueira de cana-de-açúcar em duas condições hídricas (35% e 70% CRA) combinado com ausência (-Si) e presença de Si (+Si). Letras maiúsculas indicam diferenças estatísticas significativas entre as condições hídricas, enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre os níveis de suprimento de Si. NS, * e **: Indicam, respectivamente, diferença não significativa, significativa ao nível de 0,05 e altamente significativa ao nível de 0,01 no teste F.

4.5 Números de colmos, produção de biomassa e produtividade de soqueira de cana-de-açúcar

A diminuição da CRA de 70% para 35%, na ausência da fertirrigação com Si, diminuiu o número de colmos por touceiras, enquanto a fertirrigação com Si, aumentou na condição de 35% da CRA e, na condição de 70% da CRA, não

houve resposta significativa (Figura 7a). A diminuição da CRA de 70% para 35%, na ausência da fertirrigação com Si, diminuiu a massa seca das folhas e dos colmos (Figura 7b, Figura 7c), enquanto a fertirrigação com Si aumentou somente na condição de 70% da CRA (Figura 7b, Figura 7c). A diminuição da CRA de 70% para 35%, na ausência da fertirrigação com Si, diminuiu a produtividade (Figura 7d), enquanto a fertirrigação com Si aumentou nas duas condições hídricas (35% e 70% da CRA) (Figura 7d).

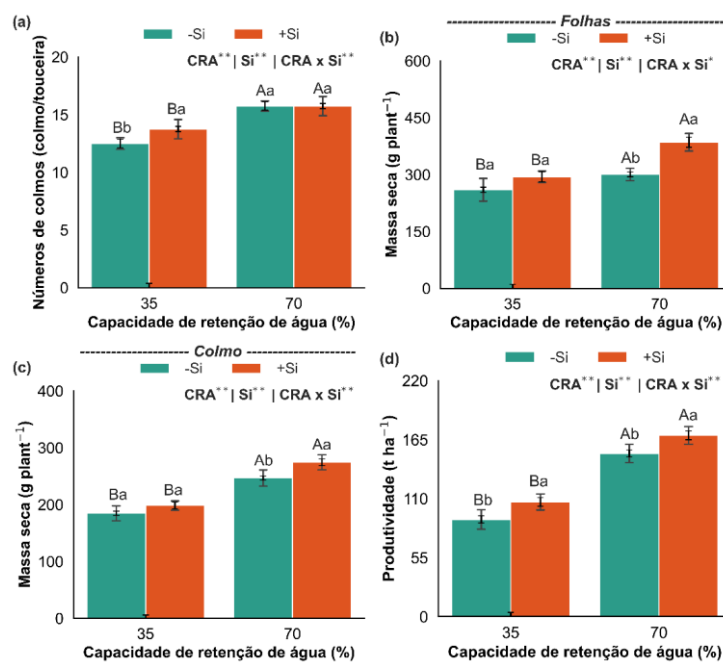


Figura 7 – Número de colmos (a), massa seca das folhas (b), massa seca dos colmos (c) e produtividade (d) em soqueira de cana-de-açúcar em duas condições hídricas (35% e 70% CRA) combinado com ausência (-Si) e presença de Si (+Si). Letras maiúsculas indicam diferenças estatísticas significativas entre as condições hídricas, enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre os níveis de suprimento de Si. NS, * e **: Indicam, respectivamente, diferença não

significativa, significativa ao nível de 0,05 e altamente significativa ao nível de 0,01 no teste F.

4.6 Correlação das variáveis de crescimento e nutricionais em soqueira de cana-de-açúcar

Observamos uma correlação muito forte ($r = 1.00$) entre a massa seca das plantas e o acúmulo de C nas folhas. Similarmente, a concentração de N está fortemente correlacionada com o acúmulo de N ($r = 0.96$). A concentração de Si também tem uma correlação muito forte com o acúmulo de Si ($r = 1.00$). A produtividade está positivamente relacionada com várias variáveis, incluindo massa seca ($r = 0.77$), acúmulo de carbono ($r = 0.77$), acúmulo de nitrogênio ($r = 0.75$) e acúmulo de fósforo (P) ($r = 0.71$). A eficiência de uso de C, N e P também indica correlações significativas com outras variáveis, como a eficiência de uso de C tem uma correlação positiva com a massa seca ($r = 1.00$) e o acúmulo de carbono ($r = 1.00$), enquanto as eficiências de uso de nitrogênio e fósforo apresentam correlações mais variadas.

A relação C:N, que representa a proporção de carbono para nitrogênio nas plantas, tem uma correlação negativa com a produtividade ($r = -0.79$). Além disso, a relação C:N tem correlações negativas com a eficiência de uso de carbono ($r = -0.78$), eficiência de uso de N ($r = -0.44$), e eficiência de uso de P ($r = -0.27$). A relação C:P, que representa a proporção de C para P, também aponta uma correlação negativa com a produtividade ($r = -0.63$). A relação C:P, que representa a proporção de carbono para fósforo, também designa uma

correlação negativa com a produtividade ($r = -0.63$). A relação C:P também tem correlações negativas com a eficiência de uso de C ($r = -0.74$), eficiência de uso de N ($r = -0.29$), e eficiência de uso de P ($r = -0.29$).

A relação C:Si, representando a proporção de C para Si, tem uma correlação negativa com a produtividade ($r = -0.50$). Adicionalmente, a relação C:Si apresenta correlações negativas com a eficiência de uso de carbono ($r = -0.66$), eficiência de uso de nitrogênio ($r = -0.22$), e eficiência de uso de fósforo ($r = -0.20$). A relação NP, que representa a proporção de nitrogênio para fósforo, apresenta uma correlação positiva com a produtividade ($r = 0.27$). No entanto, a relação NP tem correlações mistas com as eficiências de uso de nutrientes: é levemente positiva com a eficiência de uso de carbono ($r = 0.14$) e com a eficiência de uso de fósforo ($r = 0.22$), mas praticamente neutra com a eficiência de uso de nitrogênio ($r = 0.04$).

Outra observação interessante é a correlação negativa entre a concentração de C e a eficiência de uso de C ($r = -0.84$). Similarmente, a concentração de N e a eficiência de uso de N também indicam uma correlação negativa ($r = -0.21$), e a concentração de P e a eficiência de uso de fósforo têm uma correlação levemente negativa ($r = -0.15$).

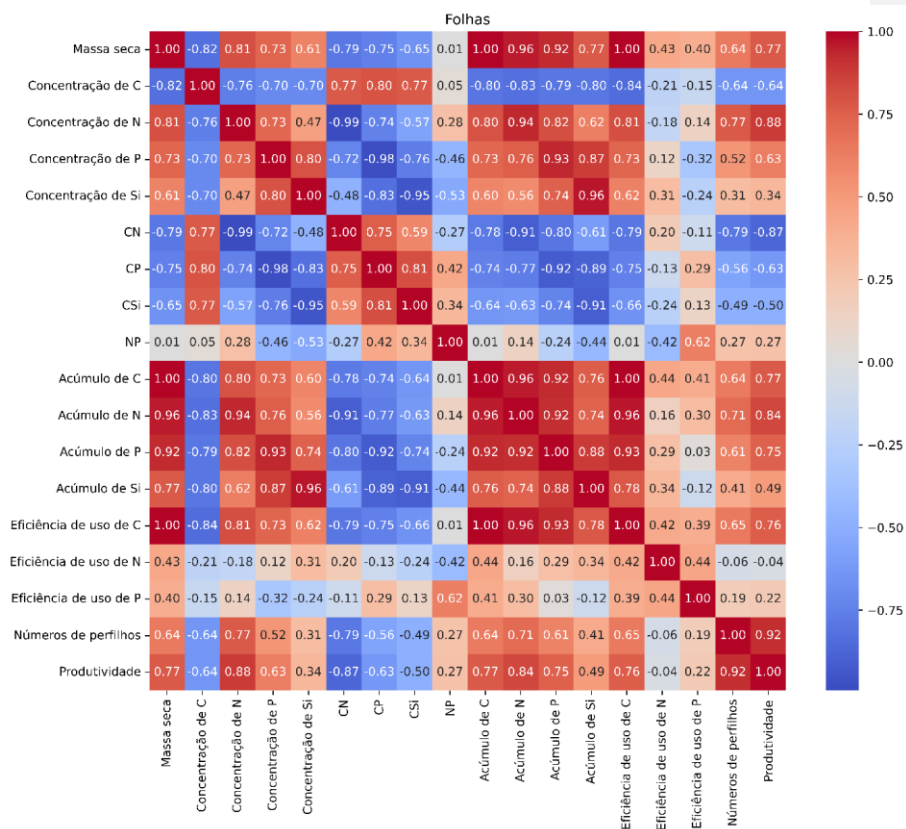


Figura 8 - Análise de correlação entre as relações as variáveis de crescimento, concentração de nutrientes, homeostase C:N:P, acúmulo de nutrientes e eficiência de uso de nutrientes em folhas de soqueira de cana-de-açúcar cultivado com duas condições hídricas (35 e 70% da CRA) combinado com suprimento de Si (-Si e +Si). O coeficiente de correlação de Pearson foi utilizado para calcular essas relações, que variam de -1 a 1, mostrando a força e a direção das conexões entre as variáveis. Valores próximos de 1 indicam correlações fortes positivas, enquanto valores próximos de -1 indicam correlações fortes negativas. As cores no gráfico ajudam a visualizar essas correlações: vermelho intenso para correlações positivas fortes, azul intenso para correlações negativas fortes, e tons mais claros para correlações mais fracas

Observamos uma correlação muito forte ($r = 0.98$) entre a massa seca dos colmos e o acúmulo de C. Similarmente, a concentração de N está fortemente correlacionada com o acúmulo de N ($r = 1.00$). A produtividade dos colmos está positivamente relacionada com várias variáveis, incluindo massa seca ($r = 0.97$), acúmulo de C ($r = 0.97$), acúmulo de N ($r = 0.92$) e acúmulo de P ($r = 0.59$). A eficiência de uso de C também mostra correlações positivas significativas com a massa seca ($r = 0.97$) e o acúmulo de C ($r = 0.97$). A eficiência de uso de N tem uma correlação positiva com o acúmulo de N ($r = 0.59$), enquanto a eficiência de uso de P apresenta uma correlação moderada com o acúmulo de P ($r = 0.45$).

As relações entre os nutrientes CN, CP, C:Si e NP apresentam impactos significativos na produtividade e nas eficiências de uso de nutrientes dos colmos. A relação CN, que representa a proporção de carbono para nitrogênio, tem uma correlação negativa com a produtividade ($r = -0.64$), sugerindo que uma maior relação CN pode estar associada a uma menor produtividade. A relação CP, que representa a proporção de carbono para fósforo, também mostra uma correlação negativa com a produtividade ($r = -0.64$). A relação C:Si, representando a proporção de C para Si, tem uma correlação negativa com a produtividade ($r = -0.05$), indicando um impacto menos significativo. Enquanto, a relação N:P, que representa a proporção de N para P, apresenta uma correlação levemente negativa com a produtividade ($r = -0.36$).

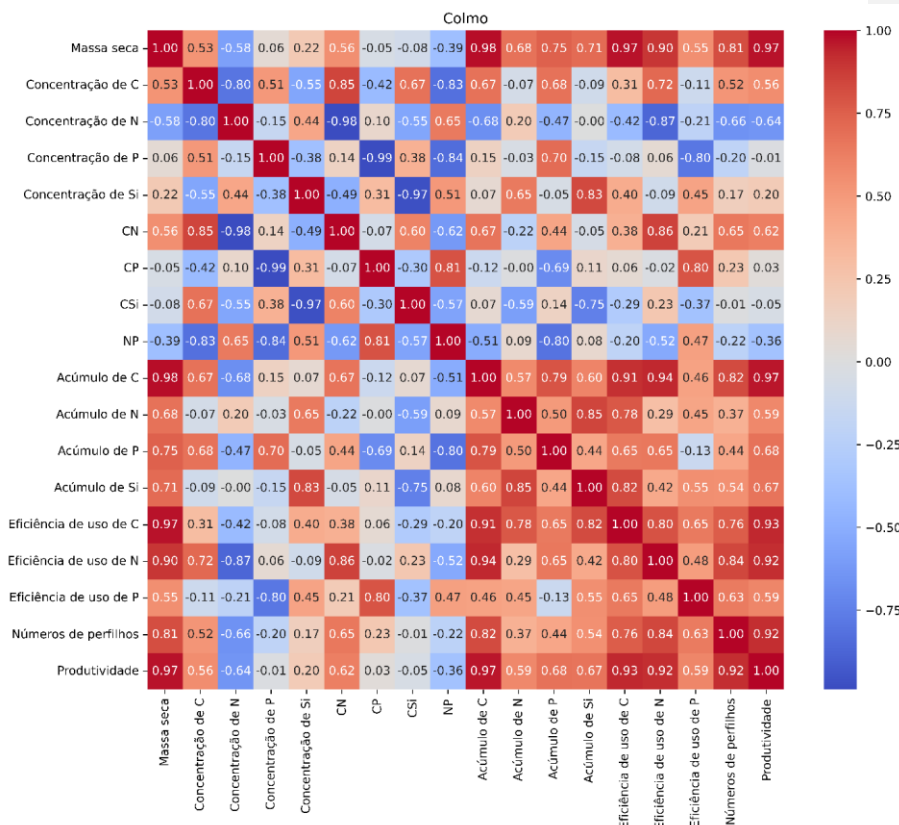


Figura 9 - Análise de correlação entre as relações as variáveis de crescimento, concentração de nutrientes, homeostase C:N:P, acúmulo de nutrientes e eficiência de uso de nutrientes em colmos de soqueira de cana-de-açúcar cultivado com duas condições hídricas (35 e 70% da CRA) combinado com suprimento de Si (-Si e +Si). O coeficiente de correlação de Pearson foi utilizado para calcular essas relações, que variam de -1 a 1, mostrando a força e a direção das conexões entre as variáveis. Valores próximos de 1 indicam correlações fortes positivas, enquanto valores próximos de -1 indicam correlações fortes negativas. As cores no gráfico ajudam a visualizar essas correlações: vermelho intenso para correlações positivas fortes, azul intenso para correlações negativas fortes, e tons mais claros para correlações mais fracas

5. DISCUSSÃO

5.1. Impacto do déficit hídrico na homeostase C:N:P e na produtividade da soqueira da cana-de-açúcar

A literatura existente oferece numerosos relatos sobre o impacto do déficit hídrico na cultura da cana-de-açúcar na ausência de silício (Si), destacando uma drástica redução na produtividade atribuída principalmente a danos nos processos fisiológicos da planta (Bezerra et al., 2019; Camargo et al., 2019; Teixeira et al., 2021). Os resultados do presente estudo corroboram essas observações, evidenciando que o déficit hídrico levou a perdas substanciais de produtividade, principalmente pela redução na quantidade de C, N, P e Si em folhas e colmos de soqueira (Figura 5). A ausência de fertirrigação com Si sob condições de restrição hídrica resultou em uma notável diminuição na eficiência de uso de C, N e P (Figura 6), enfatizando a influência crítica do Si na manutenção da eficiência nutricional sob estresse hídrico.

O déficit hídrico compromete o transporte de nutrientes das raízes para a parte aérea da planta, reduzindo a taxa de transpiração e, consequentemente, a eficiência dos transportadores de nutrientes (Silva et al., 2011). Essa redução no transporte e na redistribuição de nutrientes afeta negativamente a ciclagem de nutrientes, provocando desequilíbrios na homeostase C:N:P e impactando diretamente a eficiência de uso desses nutrientes (Figura 6). A principal causa desse desequilíbrio é a redução da relação C:N nos colmos, acompanhada pelo aumento das relações C:P e N:P nas folhas e nos colmos, o que já foi

previamente documentado por outros autores (Costa et al., 2023), entretanto, em condições controladas, indicando que este efeito pode ser extrapolado para condições de campo.

Além disso, nossos dados indicam que a restrição hídrica resultou em uma redução no número de colmos por touceira, na massa seca das folhas e colmos, e na produtividade total da soqueira (Figura 7). Estes efeitos adversos estão fortemente relacionados às alterações nas relações estequiométricas de C:N:P, que variam entre os diferentes órgãos da planta, como evidenciado pela análise de correlação nas folhas (Figura 8) e nos colmos (Figura 9). Estudos anteriores, como o de Costa et al. (2022), também evidenciam que o déficit hídrico provoca perdas biológicas significativas na homeostase C:N:P em plantas de cana-de-açúcar, comprometendo a eficiência de uso de nutrientes e a biossíntese de biomassa.

As plantas sob estresse hídrico tendem a adotar estratégias para restabelecer a homeostase estequiométrica, buscando um novo equilíbrio em seu metabolismo (Prado e Silva., 2017). No entanto, em condições extremas, como as empregadas neste estudo (35% da capacidade de campo), essas estratégias mostraram-se ineficazes na manutenção do equilíbrio C:N:P. A escassez de N e P, combinada com um desbalanço na proporção destes nutrientes em relação ao C, juntamente com a ineficiência no uso dos nutrientes em condições de déficit hídrico na ausência de Si, foi determinante para o limitado acúmulo de biomassa observado (Oliveira Filho et al., 2021).

Portanto, os resultados confirmam que o déficit hídrico induzido em comparação à soqueira de cana-de-açúcar sob regime hídrico adequado exerce

influência nutricional, desestabilizando a homeostase C:N:P e resultando em uma significativa perda de eficiência nutricional e produtividade na primeira soqueira da cana-de-açúcar.

5.2. Papel do silício na atenuação dos danos do déficit hídrico na homeostase C:N:P e na produtividade da soqueira da cana-de-açúcar

Embora o silício não seja classificado como um elemento essencial, ele desempenha um papel importante na cana-de-açúcar, complementando a ação dos nutrientes essenciais. O Si desempenha um papel crucial na resiliência da planta, especialmente em condições adversas, como a restrição hídrica (Costa et al., 2023). Este estudo reforça a ideia de que a cana-de-açúcar, uma planta naturalmente acumuladora de Si, responde de forma positiva e significativa à aplicação desse elemento via fertirrigação. Os resultados demonstram que o fornecimento de Si influencia diretamente o acúmulo de C, N, P e do Si nas folhas e colmos da soqueira de cana-de-açúcar. Estes resultados indicam que o Si atua diretamente na distribuição e a utilização desses elementos vitais, otimizando o funcionamento da planta mesmo sob condições de estresse.

Uma descoberta interessante foi a correlação negativa entre as concentrações de C e Si, sugerindo uma espécie de substituição entre esses elementos (Figuras 8 e 9). À medida que a concentração de Si aumentava, o acúmulo de C diminuía, talvez indicando que a planta, ao absorver mais Si, encontra uma maneira mais eficiente de utilizar o carbono disponível. O Si é capaz de formar fitossilicatos na parede celular, diminuindo a demanda de compostos ricos em C, impactando diretamente a demanda de C por grama de

massa seca sintetizada (Costa et al., 2024). Por outro lado, a correlação positiva entre N, P e Si sugere que o Si pode estar potencializando a absorção e a disponibilidade desses nutrientes, como um facilitador que aprimora a capacidade da planta de se nutrir de forma mais equilibrada e eficaz (Costa et al., 2024).

Quando observamos as razões estequiométricas C:N, C:P e C:Si (Figura 2), a redução observada reflete como o Si, ao se integrar ao metabolismo da planta, ajusta esses balanços de maneira que favorece uma utilização mais eficiente dos recursos disponíveis. Isso foi particularmente evidente nas condições hídricas de 70% da capacidade de campo, onde o Si promoveu um aumento significativo na biomassa das folhas e dos colmos, enquanto sob restrição hídrica de 35%, a melhoria foi menos pronunciada, mas ainda assim presente. O menor benefício do Si na condição de déficit hídrico pode estar relacionado a menor absorção de Si, pois a diminuição da água disponível impacta diretamente na capacidade das plantas absorverem os nutrientes e do Si, diminuindo o acúmulo de Si (Figuras 5g e 5h) (Costa et al., 2024).

A relação entre o Si e a homeostase dos nutrientes é complexa. A redução nas razões C:N e C:P nas folhas e colmos indica que o Si contribui para uma nova organização interna desses elementos, ajudando a planta a reequilibrar seu metabolismo para enfrentar as condições adversas (Costa et al., 2024). Entretanto, a eficiência de uso do N não apresentou melhorias significativas, possivelmente devido à diluição resultante do aumento da biomassa seca, um fenômeno que pode ser compreendido como uma resposta adaptativa da planta, onde o foco principal é o crescimento e a sobrevivência.

Estudos recentes, como o de Dutra et al. (2023), corroboram esses achados, destacando que a fertilização com Si altera a estequiometria C:N:P e melhora a utilização de C e P em condições de campo.

Além disso, o Si parece atuar como um aliado da planta na manutenção de seu estado hídrico. Ao se depositar na parede celular, o Si ajuda a reduzir a perda de água por transpiração e melhora a osmorregulação, ajustando a condutividade hidráulica da raiz (Yan et al. 2018).

6. CONCLUSÕES

A aplicação de Si via fertirrigação demonstrou ser uma estratégia eficaz para mitigar os efeitos da restrição hídrica, contribuindo para um aumento da produtividade e da biomassa. Foi observado que o Si protege as plantas do estresse hídrico, otimizando a relação entre nutrientes, promovendo uma reorganização interna e otimizando o uso eficiente dos recursos disponíveis da planta para contornar essa adversidade.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. *Levantamento da cana-de-açúcar irrigada e fertirrigada no Brasil*. 2. ed. Brasília: ANA, 2019. 31 p.

AMIN M, AHMAD R, BASRA SMA., MURTAZA G. Silicon induced improvement in morpho-physiological traits of maize (*Zea mays* L.) under water deficit. **Pakistan Journal of Agricultural Science**, v. 51, p. 187-196, 2014.

ASHARAF, M.; HARRIS, P. J. C. Photosynthesis under stressful environments: an overview. **Photosynthetica**, v. 51, p. 163-190, 2013.

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.

BATTIE-LACLAU, P., JS DELGADO-ROJAS, M. CHRISTINA, Y. NOUVELLON, JP BOUILLET, MDEC PICCOLO E JP LACLAU. A fertilização com potássio aumenta a eficiência do uso da água para a produção de biomassa do caule sem afetar a eficiência intrínseca do uso da água nas plantações de *Eucalyptus grandis*. **Ecologia e Manejo Florestal**, v. 364, p. 77–89, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.01.004>.

BEZERRA BKL, LIMA GPP, DOS REIS AR, SILVA M DE A, DE CAMARGO MS. Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 41, p. 189, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>.

BOKHTIAR SM, HUANG HR, LI YR, DALVI VA. Effects of silicon on yield contributing parameters and its accumulation in abaxial epidermis of sugarcane leaf blades using energy dispersive x-ray analysis. **Journal of Plant Nutrition**, v. 35, p. 1255-1275, 2012.

BOKOR B, SANTOS CS, KOSTOLÁNI D, MACHADO J, DA SILVA MN, CARVALHO SMP, et al. Mitigação de mudanças climáticas e riscos ambientais em plantas: papel potencial do metalóide benéfico silício. **Journal of Hazardous Materials**, v. 416, p. 126193, 2021.

CAMARGO MS, BEZERRA BKL, HOLANDA LA, OLIVEIRA AL, VITTI AC, SILVA MA. Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 81–91, 2019.

CAMPELO, D. H.; LACERDA, C. F.; SOUSA, J. A.; CORREIA, D.; BEZERRA, A.M. E.; ARAÚJO, J. D. M.; NEVES, A. L. R. Trocas gasosas e eficiência do fotossistema II em plantas adultas de seis espécies florestais em função do suprimento de água no solo. **Revista Árvore**, v. 39, n. 1, p. 973-983, 2015.

CARNEIRO LF, OLIVEIRA RAD, WEBER H, DAROS E, BERTON GS, RODRIGUES FV. Alternative sugarcane production for conservation of sandy soils: sugarcane straw, intercropping and nitrogen. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, p. 1-9, 2020.

CHEN, D.; WANG, S.; YIN, L.; DENG, X. How does silicon mediate plant water uptake and loss under water deficiency? **Frontiers in Plant Science**, v. 9, art. 281, 2018.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, Brasília, DF, v. 12, n. 1, abril 2024.

CONAB, C. N. A. Acompanhamento da Safra Brasileira - Cana de açúcar - SAFRA 2020/21 - Segundo levantamento - Agosto 2020. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Grãos**, v. 7, p. 64, 2020.

CORNELIS, J. T.; DELVAUX, B.; GEORG, R.B.; LUCAS, Y.; RANGER, J.; OPFERGELT, S. Tracing the origin of dissolved silicon transferred from various soil-plant systems towards rivers: a review. **Biogeosciences**, v. 8, p. 89–112, 2011.

COSTA MG, DOS SANTOS SARAH MM, DE MELLO PRADO R, PALARETTI LF, DE CÁSSIA PICCOLO M E DE SOUZA JÚNIOR JP. Impact of Si on C, N, and P stoichiometric homeostasis favors nutrition and stem dry mass accumulation in sugarcane cultivated in tropical soils with different water regimes. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, art. 949909, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.949909>.

COSTA, M. G. et al. New approaches to the effects of Si on sugarcane ratoon under irrigation in Quartzipsamments, Eutrophic Red Oxisol, and Dystrophic Red Oxisol. **BMC Plant Biology**, v. 23, n. 51, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04077-2>.

DATNOFF, L. E., SNYDER, G. H., KORNDÖRFER, G. H. Silicon in Agriculture. Amsterdam: **Elsevier**, p. 403, 2001.

DE OLIVEIRA FILHO, ASB, DE MELLO PRADO, R., TEIXEIRA, GCM et al. Water deficit modifies C:N stoichiometry affecting sugarcane and energy cane yield and its relationships with silicon supply. **Scientific Reports**, v. 11, art. 20916, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00441-0>.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. *Cana de Açúcar*. **Campinas: Instituto Agrônomo**, 2008.

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

DUTRA, AF, LEITE, MRL, MELO, CCDF et al. Soil and foliar Si fertilization alters elemental stoichiometry and increases yield of sugarcane cultivars. **Scientific Reports**, v. 13, art. 16040, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43351-z>.

FARIA, R. J. Influência do silicato de cálcio na tolerância do arroz de sequeiro ao déficit hídrico do solo. 47 f. Dissertação (Mestrado em Solos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

FAROOQ, M.A.; DIETZ, K.J. Silicon as versatile player in plant and human biology: overlooked and poorly understood. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, art. 994, 2015.

FENG YQ. Fertilizante silicioso se tornará um novo produto fertilizante na expansão da agricultura na China. **J Chem Fert Ind.**, v. 27, p. 9–11, 2000.

FRAZÃO, JJ, PRADO, RD, DE SOUZA JÚNIOR, JP et al. Silício altera a estequiometria C:N da cana-de-açúcar e suas consequências para a fotossíntese, partição de biomassa e crescimento vegetal. **Scientific Reports**, v. 10, art. 12492, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69310-6>.

FRIES, A. et al. Water balance and soil moisture deficit of different vegetation units under semiarid conditions in the Andes of Southern Ecuador. **Climate**, v. 8, p. 1–22, 2020.

GÜSEWELL, S. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance. **New Phytologist**, v.164, p. 243–266, 2004.

HESSINI, K., JP MARTÍNEZ, M. GANDOUR, A. ALBOUCHI, A. SOLTANI E C. ABDELLY. Efeito do estresse hídrico no crescimento, ajuste osmótico, elasticidade da parede celular e eficiência no uso da água em *Spartina alterniflora*. **Botânica Ambiental e Experimental**, v. 67, p. 312–319, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.010>.

HOANG, D.T., HIROO, T., YOSHINOBU, K. Nitrogen use efficiency and drought tolerant ability of various sugarcane varieties under drought stress at early growth stage. **Plant Production Science**, v. 22, p. 250–261, 2019.

Lana, R. M. Q., Korndörfer, G. H., Zañão Júnior, L. A., Silva, A. F. & Lana, A. M. Q. Efeito do silicato de cálcio sobre a produtividade e acumulação de silício no tomateiro. **Bioscience Journal**, v. 19, p. 15-20, 2003.

Formatted: Portuguese (Brazil)

LENZ, TI, IJ WRIGHT E M. WESTOBY. Inter-relações entre características da curva pressão-volume entre espécies e gradientes de disponibilidade de água. **Fisiologia Plantarum**, v. 127, p. 423–433, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00680.x>.

LEXAS J, BARBOUR MM, BRENDELO, CABRERA HM, CARRIQUÍ M, DÍAZESPEJO A, DOUTHE C, DREYER E, FERRIO JP AND GAGO J. Mesophyll diffusion conductance to CO₂: an unappreciated central player in photosynthesis. **Plant Science**, v. 193, p. 70-84, 2012.

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**. v.6, n.9, p. 64881-64892, 2020.

LUZ, L. D.; KALINOVSKI, E. C. Z.; PAROLIN, M.; SOUZA FILHO, E. E. Estágio atual do conhecimento sobre fitólitos no Brasil. **Terrae Didática**, v. 11, n. 1, p. 52-64, 2015.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v.11, p. 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, Physiscal and Biological Sciences**, v.87, p.377-385, 2011.

MADELLA, M.; JONES, M, K.; ECHLIN, P.; POWERS-JONES, A.; MOORE, M. Plant water availability and analytical microscopy of phytoliths: Implications for ancient irrigation in arid zones. **Quaternary International**, v. 193, p. 32-40, 2009.

MANHÃES, C. M. C. et al. Factors that affect sprouting and tillering of sugar cane. **Vértices**, v. 17, p. 163-191, 2015.

MARCHIORI, P.E.R. et al. Physiological plasticity is important for maintaining sugarcane growth under water deficit. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 2148, 2017

MARQUES, D. J. Proporções de silicato e carbonato de cálcio no crescimento, nutrição mineral e eficiência do uso da água por plantas de milho sob estresse hídrico. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, p.184, 2013.

MILTON GARCIA COSTA, RENATO DE MELLO PRADO, LUIZ FABIANO PALARETTI, JONAS PEREIRA DE SOUZA JÚNIOR. The effect of abiotic stresses on plant C:N homeostasis and their mitigation by silicon. **The Crop Journal**, v. 12, n. 2, p. 340-353, 2024. ISSN 2214-5141. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.11.012>.

MING DF, PEI ZF, NAEEM MS, GONG HJ, ZHOU WJ. Silicon alleviates PEG-induced water-deficit stress in upland rice seedlings by enhancing osmotic adjustment. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 198, p. 14-26, 2012.

MIRANDA-APODACA, J., U. PÉREZ-LÓPEZ, M. LACUESTA, A. MENA-PETITE E A. MUÑOZ-RUEDA. A interação entre seca e CO₂ elevado nas relações hídricas em duas espécies de pastagens é específica da espécie. **Journal of Plant Physiology**, v. 220, p. 193–202, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.11.006>.

MORENO-FONCECA, L. P. Respuesta de las plantas alestrés por deficit hídrico: una revisión. **Agronomía Colombiana**, v. 27, p. 179-191, 2009.

Moreira, A. R., Fagan, E. B., Martins, K. V. & Souza, C. H. E. Resposta da cultura de soja a aplicação de silício foliar. **Bioscience Journal**, v. 26, p. 413-423, 2010.

NEU S, SCHALLER J, DUDEL EG. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports**, v. 7, p. 1–8, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep40829>.

NIO, SA, DP MANTILEN-LUDONG E LJ WADE. Comparação da expressão do ajuste osmótico foliar no trigo (*Triticum aestivum* L.) sob déficit hídrico entre a planta inteira e os níveis do tecido. **Agriculture and Natural Resources**, v. 52, p. 33–38, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.anres.2018.03.003>.

OLIVEIRA FILHO, Antonio Santana Batista de; PRADO, Renato de Mello; TEIXEIRA, Gelza Carliane Marques; ROCHA, Antonio Márcio Souza; SOUZA JUNIOR, Jonas Pereira de; PICCOLO, Marisa de Cássia; ROCHA, Juan Ricardo. Silicon attenuates the effects of water deficit in sugarcane by modifying physiological aspects and C:N stoichiometry and its use efficiency. **Agricultural Water Management**, v. 255, 2021, p. 107006. ISSN 0378-3774. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107006>.

PEREIRA, L. A. G.; BARRETO, J. B. Geografia das exportações de açúcar e de etanol no estado de Minas Gerais. **Revista Campo-Território**, v. 15, n. 36, p. 230-258, 2020.

PONTIGO, S. et al. Silicon in vascular plants: Uptake, transport and its influence on mineral stress under acidic conditions. **Planta**, v.242, p.23–37, 2015.

PRADO RM. **Mineral nutrition of tropical plants**. 1.ed, p.339, 2021.

PRADO, RM & SILVA, GP Ecological response to global change: changes in C:N:P stoichiometry in environmental adaptations of plants. **Plant Ecology**:

Traditional Approaches to Recent Trends. 2017. Disponível em:
<https://doi.org/10.5772/intechopen.69246>.

QUAGGIO, J. A. et al. Cana-de-açúcar. In CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JÚNIOR, D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. V. (Eds.). Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. **Campinas: Instituto Agrônomo**, p. 177-186, 2022.

RUSHIL MANDLIK, VANDANA THAKRAL, GAURAV RATURI, SUHAS SHINDE, MIROSLAV NIKOLIĆ, DURGESH K TRIPATHI, HUMIRA SONAH, RUPESH DESHMUKH, Significado da absorção, transporte e deposição de silício em plantas. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, n. 21, p. 6703–6718, 2 dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>.

SAITO, T. E I. TERASHIMA. Diminuições reversíveis no módulo de elasticidade volumoso de folhas maduras de espécies caducas de *Quercus* submetidas a dois tratamentos de seca. **Célula Vegetal Ambiental**, v. 27, p. 863–875, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2004.01192.x>.

SAMUELS, G. Silicon and Sugar. Sugar y Azucar, **Engliword**, v. 65, p. 25 - 29. 1969.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E. et al. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, p. 19-36, 2006.

SILVA EC, NOGUEIRA RJMC, SILVA MA, ALBUQUERQUE MB. Estresse de seca e nutrição de plantas. **Estresse de plantas**, v. 5, p. 32–41, 2011.

SOUZA, J. L. M. et al. Adjustment of water-crop production models for ratoon sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, p. 426–433, 2015.

SUGAWARA, L. M.; RUDORFF, B. F. T. Acompanhamento do crescimento vegetativo da cana-de-açúcar por meio de séries temporais de NDVI do sensor Modis. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, Curitiba: INPE, p. 391, 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.M.; MURPHY, A. Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal. **Artmed**, 6ª ed. Porto Alegre-RS, p.888, 2017.

TEIXEIRA GCM, DE MELLO PRADO R, OLIVEIRA KS, D'AMICODAMIÃO V, SOUSA JUNIOR GS. Silicon increases leaf chlorophyll content and iron nutritional efficiency and reduces iron deficiency in sorghum plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 1, p. 1–10, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00214-0>.

TEIXEIRA, G. C. M.; ROCHA, A. M. S.; OLIVEIRA, K. S.; SARAH, M. M. S.; OLIVEIRA FILHO, A. S. B.; PRADO, R. M.; PALARETTI, L. F. Silício na mitigação dos estresses por deficiência de manganês e pelo déficit hídrico em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (Revisão Bibliográfica). **Revista de Ciências Agrária**, v.48, n.2, p.170-187, 2020.

TEIXEIRA, G.C.M., DE MELLO PRADO, R. Silicon Mitigates the Effects of Water Deficit in Tropical Plants. In: de MELLO PRADO, R. (eds) Benefits of Silicon in the Nutrition of Plants. **Springer Nature Switzerland**, Cham, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-26673-7_16

THOMÉ, P.; VAZ, T. A.; GROFF, A. M. Fatores e Técnicas do cultivo Cana-de-Açúcar e sua correlação com a Qualidade e a Produtividade. In: **Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial**. Biometria em Cana-de-Açúcar. Paraná: UNESPAR, 2017.

VERMA, K.K. et al. The impact of silicon on photosynthetic and biochemical responses of sugarcane under different soil moisture levels. **Silicon**, v. 12, p. 1355–1367, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00228-z>

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

Yan G chao, Nikolic M, Ye M jun, Xiao Z xi, Liang Y chao. Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 17, p. 2138–2150, 2018.

YE, Y. et al. Carbon, nitrogen and phosphorus accumulation and partitioning, and C:N:P stoichiometry in late-season rice under different water and nitrogen managements. **Plos One**, v.9, p.102-115, 2014.

ZIVCAK, M., M. BRESTIC E O. SYTAR. Ajuste osmótico e adaptação das plantas ao estresse hídrico. Em Tolerância ao estresse hídrico em plantas, ed. M. Hossain, S. Wani, S. Bhattacharjee, D. Burritt e LS Tran. **Suíça: Springer International Publishing**, p. 105–143, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-28899-4_5.