

FABIANO SIMPLICIO BEZERRA

**EFEITO DO USO DE SÍLICA AMORFA NA AMENIZAÇÃO DO ESTRESSE
HÍDRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR**

RECIFE – PE

2024

FABIANO SIMPLICIO BEZERRA

**EFEITO DO USO DE SÍLICA AMORFA NA AMENIZAÇÃO DO ESTRESSE
HÍDRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola

Orientador: Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza

Coorientadores: Prof. Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento

Prof. Dr. Renato de Mello Prado

RECIFE – PE

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B574e

Simplicio Bezerra, Fabiano

Efeito do uso de sílica amorfa na amenização do estresse hídrico em cana-de-açúcar / Fabiano Simplicio Bezerra. - 2024.

135 f. : il.

Orientador: Edivan Rodrigues de Souza.

Coorientador: Clistenes Williams Araujo do Nascimento, Renato de Mello Prado.

Inclui referências.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, 2024.

1. Irrigação deficitária. 2. *Saccharum officinarum* L.. 3. Ajustamento osmótico. 4. Eficiência nutricional. I. Souza, Edivan Rodrigues de, orient. II. Prado, Clistenes Williams Araujo do Nascimento, Renato de Mello, coorient. III. Título

CDD

FABIANO SIMPLICIO BEZERRA

Engenheiro Agrônomo

**EFEITO DO USO DE SÍLICA AMORFA NA AMENIZAÇÃO DO ESTRESSE
HÍDRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola (Área de Concentração Engenharia de Água e Solo).

DEFENDIDA e APROVADA em 27 de junho de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza - DEPA- UFRPE

Presidente / Orientador

Prof.^a Dr.^a Gelza Carliane Marques Teixeira – IFTO

Examinadora Externa

Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva - DEAGRI – UFRPE

Examinador Interno

Prof. Dr. Airon José da Silva - DEA - UFES

Examinador Externo

Prof. Dr. Ygor Jacques Agra Bezerra da Silva - DEPA-UFRPE

Examinador Externo

"Seja quem você for, seja qualquer posição que você tenha na vida, em nível altíssimo ou mais baixo, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira, você chega lá."

Ayrton Senna

Aos meus pais, Cleonízio Felizardo Bezerra e Eurides Simplicio Bezerra, as minhas irmãs Fabiana Simplicio Bezerra e Maria de Fatima Simplicio Bezerra, e a minha Sobrinha Larissa Gabrielly Simplicio Gonçalves. Devo cada vitória alcançada a vocês, os grandes amores da minha vida.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder saúde, sabedoria e perseverança durante toda esta jornada acadêmica.

À minha família, especialmente aos meus pais, Cleonizio Felizardo Bezerra e Eurides Simplicio Bezerra, pelo amor incondicional, apoio constante e por acreditarem em mim em todos os momentos. Meus pais, agricultores familiares simples, sempre batalharam muito e me deram a oportunidade de estudar, algo que nunca esquecerei. Às minhas irmãs, Fátima e Fabiana, que sempre se preocuparam comigo, enviando mensagens para saber se tudo estava indo bem. Vocês foram fundamentais durante todo esse período em que estive distante. Muito obrigado pelo apoio e torcida!

Ao meu orientador Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza, pela orientação, paciência e dedicação ao longo deste trabalho. Suas valiosas contribuições foram fundamentais para a realização desta pesquisa. Prof. Edivan me acolheu em um momento difícil do doutorado, serei eternamente grato pela oportunidade e por ter aceitado acompanhar-me nesta jornada.

Aos meus coorientadores Prof. Dr. Clistenes Williams Araújo do Nascimento e Prof. Dr. Renato de Mello Prado, pelo empenho dedicado à minha formação e pelas contribuições nesta pesquisa. Agradeço-lhes também pela gentileza de ceder a estrutura dos laboratórios para a realização de análises. Na etapa final, o Prof. Renato, foi especialmente generoso ao disponibilizar uma aluna de doutorado de seu grupo de pesquisa (Genplant / UNESP), a Deyviellen, para ajudar em umas análises nutricionais. Esse suporte foi fundamental para a conclusão desta pesquisa. Minha profunda gratidão a Deyviellen!

A toda a equipe do grupo de pesquisa Solo-água-planta (SAP), em especial a Welliton, Alfredo, Steffany, Nino e Martha, por suas contribuições na instalação e condução do experimento, assim como pela convivência e momentos de descontração. A Diana e Allef pelas contribuições nessa pesquisa, e a Jaciane e Rafael pelos momentos de conversa. Ao PNPd do grupo de pesquisa Dr. Lucas, pela sua dedicação e contribuição na etapa final do experimento. Este grupo de pesquisa me acolheu e proporcionou um significativo crescimento profissional, sou profundamente grato a cada membro que dele faz parte.

Aos amigos Gabriel, Frank e Amanda, agradeço pelo apoio mútuo e pelas conversas enriquecedoras que tornaram esta jornada mais leve e gratificante. Gabriel se tornou um grande amigo, e levarei comigo sua amizade. Frank, sempre disponível para discutir sobre o Si e me ajudar com análises no laboratório de química ambiental, aprendi muito com você, meu amigo;

você é brilhante! E Amanda, sempre pronta para esclarecer minhas dúvidas sobre cana-de-açúcar, sou profundamente grato pela sua ajuda.

Ao Prof. Dr. Emidio Cantídio, por todo suporte quando o procurei para tirar dúvidas com a adubação do experimento e ao Prof. Dr. Manassés Mesquita da Silva em questões relacionadas ao sistema de irrigação.

À Dra. Paula Renata, exemplo de profissional em quem me espelho, pela sua educação e atenção ao me atender sempre que precisei.

A Técnica do Laboratório de Química Ambiental, Dra. Simone Lins, e à Dra. Adriana pelo suporte laboratorial e pela disponibilidade em esclarecer minhas dúvidas sobre as análises químicas.

Ao Técnico do Laboratório de Física do Solo, Eudes Oliveira, por todo o suporte dado durante esse período, e pelos momentos de conversa.

Aos colegas do Laboratório de Física do Solo, Paulo, Alisson, Arnaldo, Edilson, Talmo e Lua, pela convivência e momentos de descontração.

A PNPD Dra. Cintia Caroline pela ajuda em etapas dessa pesquisa em todas as vezes que fui ao laboratório de microbiologia do solo.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco - Departamento de Engenharia Agrícola, pelas oportunidades de crescimento e aprendizado que me proporcionaram durante minha formação acadêmica e profissional.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEA) pela oportunidade de crescimento profissional. Em especial, ao Prof. Dr. Ênio, que, durante seu período como coordenador do programa, forneceu todo o suporte financeiro necessário para a montagem do experimento. Minha gratidão!

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por meio das quais recebi apoio financeiro (bolsa).

À Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC), por disponibilizar o solo e o material vegetal para a realização do experimento. Em especial ao diretor Dr. Djalma Euzébio Simões Neto pelo apoio. E aos técnicos e funcionários da estação, George, João, Jean, Evanilson, Dona Suzana e Seu Armando, que de alguma forma, contribuíram para minha formação, minha gratidão!

Enfim, a todos aqueles que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho, deixo aqui o meu mais sincero agradecimento.

Muito obrigado a todos!

RESUMO GERAL

Nos últimos anos, as áreas de cultivo irrigado de cana-de-açúcar têm se expandido para regiões sujeitas a déficit hídrico, expondo a cultura a diferentes níveis de estresse hídrico, especialmente durante as fases críticas de desenvolvimento. Os sistemas de produção agrícola atuais enfrentam o desafio de manter altas taxas de produção com recursos cada vez mais limitados. Nesse contexto, uma estratégia promissora para mitigar os efeitos do estresse hídrico é a aplicação de silício (Si) em combinação com a irrigação deficitária. No entanto, ainda há uma escassez de pesquisas que identifiquem a melhor fonte e dose de Si a ser aplicada. Acredita-se que a utilização da sílica amorfa, com 26% de Si disponível, em uma dose ótima, possa intensificar os benefícios para a cana-de-açúcar cultivada sob condições de déficit hídrico. Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação de doses de Si via solo, na forma de sílica amorfa, sobre o crescimento, relações hídricas, fisiológicas e nutricionais em plantas de cana-de-açúcar cultivadas sob déficit hídrico moderado e severo, no período de 60 a 150 dias após o plantio. Para isso, foi conduzido um experimento em casa de vegetação, utilizando um esquema fatorial 2×4 , com dois níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura - ETc) e quatro doses de Si: 0 (testemunha), 78, 117, e 156 kg ha⁻¹ de Si, correspondentes a 0, 300, 450 e 600 kg ha⁻¹ de sílica amorfa. Os tratamentos foram dispostos em delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro repetições. Foram determinadas variáveis biométricas, hídricas, fisiológicas e nutricionais. A condição de maior déficit hídrico (20% da ETc) limitou o crescimento da cana-de-açúcar. Porém, a nutrição com Si proporcionou um efeito benéfico ao reduzir as perdas na altura do colmo, alcançando um valor máximo de 1,71 m na dose de Si de 82,1 kg ha⁻¹. A fertilização com Si em doses ótimas melhorou as respostas fisiológicas das plantas, aumentando o potencial hídrico e o conteúdo relativo de água nas folhas, resultando em hidratação dos tecidos vegetais. A aplicação de Si via solo, na forma de sílica amorfa, melhora a tolerância da cana-de-açúcar ao estresse hídrico severo. Essa melhoria foi evidenciada pelo aumento no conteúdo relativo de água, o que influencia positivamente as trocas gasosas foliares. A aplicação de 78,0 kg ha⁻¹ de Si, equivalente a 300,0 kg ha⁻¹ de sílica amorfa, mostrou-se eficaz na melhoria da eficiência de uso do C e na promoção de maior produção de massa seca dos colmos sob condições de déficit hídrico moderado.

Palavras - chave: irrigação deficitária, *Saccharum officinarum* L., ajustamento osmótico eficiência nutricional.

GENERAL ABSTRACT

In recent years, irrigated sugarcane cultivation areas have expanded to regions subject to water deficit, exposing the crop to different levels of water stress, especially during critical development phases. Current agricultural production systems face the challenge of maintaining high production rates with increasingly limited resources. In this context, a promising strategy to mitigate the effects of water stress is the application of silicon (Si) in combination with deficit irrigation. However, there is still a lack of research identifying the best source and dose of Si to be applied. It is believed that the use of amorphous silica, with 26% available Si, at an optimal dose, can intensify the benefits for sugarcane grown under water deficit conditions. This study aimed to evaluate the effect of Si application via soil, in the form of amorphous silica, on growth, water, physiological and nutritional relations in sugarcane plants cultivated under moderate and severe water deficit, in the period of 60 to 150 days after planting. For this purpose, an experiment was conducted in a greenhouse, using a 2×4 factorial scheme, with two irrigation levels (50 and 20% of crop evapotranspiration - E_{Tc}) and four Si doses: 0 (control), 78, 117, and 156 kg ha⁻¹ of Si, corresponding to 0, 300, 450 and 600 kg ha⁻¹ of amorphous silica. The treatments were arranged in a randomized block experimental design, with four replications. Biometric, water, physiological and nutritional variables were determined. The condition of greater water deficit (20% of E_{Tc}) limited sugarcane growth. However, Si nutrition provided a beneficial effect by reducing losses in stem height, reaching a maximum value of 1.71 m at a Si dose of 82.1 kg ha⁻¹. Si fertilization at optimal doses improved plant physiological responses, increasing water potential and relative water content in leaves, resulting in hydration of plant tissues. Si application via soil, in the form of amorphous silica, improves sugarcane tolerance to severe water stress. This improvement was evidenced by the increase in relative water content, which positively influences leaf gas exchange. The application of 78.0 kg ha⁻¹ of Si, equivalent to 300.0 kg ha⁻¹ of amorphous silica, proved to be effective in improving C use efficiency and promoting greater dry mass production of stalks under moderate water deficit conditions.

Keywords: deficit irrigation, *Saccharum officinarum* L., osmotic adjustment, nutritional efficiency.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I	20
Figura 1. Fases fenológicas da cana-de-açúcar e seus respectivos períodos em dias, bem como alturas indicativas e geometrias das plantas.....	27
Figura 2. Efeito do Si na perda de água foliar por transpiração.....	30
 CAPÍTULO II	 49
Figura 1. Temperatura máxima (T max), mínima (T min) e média (T med) e umidade relativa máxima (UR max), mínima (UR min) e média (UR med) do ar na casa de vegetação durante o período do experimento.....	53
Figura 2. Esquema da unidade experimental.....	56
Figura 3. Esquema experimental e do sistema de irrigação.....	59
Figura 4. Lisímetro de drenagem, dispositivo utilizado para medir a quantidade de água que percola pelo solo.....	60
Figura 5. Acúmulo de silício (Si) nas folhas (a) e colmos (b) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹)	66
Figura 6. Altura do colmo (a, b), diâmetro do colmo (c), número de folhas verdes (d), percentagem de folhas secas (e, f), número de perfilhos (g) e área foliar (h) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹)	68
Figura 7. Massa seca folha (a), massa seca colmo (b) e massa seca parte aérea (c, d) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura - ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹)	70
Figura 8. Conteúdo relativo de água (a), potencial hídrico (Ψ_w) (b), potencial osmótico (Ψ_o) (c, d), ajustamento osmótico (e) e índice de extravasamento de eletrólitos (f) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹)	72
Figura 9. Fluorescência inicial (Fo) (a), fluorescência máxima (Fm) (b, c), fluorescência variável (Fv) (d, e) e eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm) (f, g) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹)	74

Figura 10. Índice SPAD (a, b), teor de clorofila a (Chl a) (c), teor de clorofila b (Chl b) (d), teor de clorofila total (Chl a + b) (e) e teor de carotenóides (f) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹).....	76
Figura 11. Fotossíntese líquida (A) (a), condutância estomática (Gs) (b), concentração interna de C (Ci) (c, d) e taxa de transpiração (E) (e, f) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹)	78
Figura 12. Eficiência do uso da água (EUA) (a) e eficiência instantânea de carboxilação (EIC) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹)	79
Figura 13. Matriz de correlação de Pearson entre características fisiológicas e morfológicas em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 % ETc) (a) e (20 % ETc) (b), sob quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹)	80
 CAPÍTULO III	94
Figura 1. Temperatura máxima (T max), mínima (T min) e média (T med) e umidade relativa máxima (UR max), mínima (UR min) e média (UR med) do ar na casa de vegetação durante o período do experimento.....	98
Figura 2. Esquema da unidade experimental.....	101
Figura 3. Esquema experimental e do sistema de irrigação.....	104
Figura 4. Lisímetro de drenagem, dispositivo utilizado para medir a quantidade de água que percola pelo solo.....	105
Figura 5. Potencial hídrico (a) e ajustamento osmótico (b) em plantas de cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹)	109
Figura 6. Teores de silício (Si) nas folhas (a) e colmos (b) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹)	110
Figura 7. Teores de carbono C (a, b), N (c, d, e, f) e P (g, h) nas folhas e colmos em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹)	112

Figura 8. Razões C:Si (a, b) e C:N (c, d, e) nas folhas e colmos em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹)	114
Figura 9. Razões C:P (a, b) e N:P (c, d) nas folhas e colmos em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹)	116
Figura 10. Eficiência de uso de carbono (C) (a), nitrogênio (N) (b) e fósforo (P) (c, d) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹)	118
Figura 11. Massa seca folha (a, b), massa seca colmo (c) e massa seca parte aérea (d, e) nas folhas e colmos em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹).....	119
Figura 12. Mapa de calor de agrupamento hierárquico das variáveis resposta, concentrações e acúmulos de C, N, P e Si, razões estequiométricas de C:N:P:Si, eficiência de uso de C, N e P e partição de massa seca em folhas (a) e colmos (b) em plantas de cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas as quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha ⁻¹).....	120

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II	49
Tabela 1 - Caracterização físico-química e hídrica do solo utilizado no experimento coletado na camada de 0-20 cm.....	54
CAPÍTULO III	94
Tabela 1 - Caracterização físico-química e hídrica do solo utilizado no experimento coletado na camada de 0-20 cm.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**CAPÍTULO II**

- MO** - Matéria Orgânica
ADA - Argila Dispersa em Água
GF - Grau de Floculação
Ds - Densidade do Solo
Dp - Densidade de Partícula
SB - Soma de Bases
CTC - Capacidade de Troca Catiônica
V% - Saturação por Base
TFSA - Terra Fina Seca ao Ar
CRAS - Curva de Retenção de Água no Solo
FSA - Fertilizante de Sílica Amorfa
DAS - Dias após a semeadura
CUD - Coeficiente de uniformidade de distribuição
ETc - Evapotranspiração da cultura
AF - Área foliar
MSF - Massa seca da folha
MSC - Massa seca do colmo
MSPA - Massa seca da parte aérea
NFV - Número de folhas verdes
PFS - Percentagem de folhas secas
ROS - Espécies reativas de oxigênio
CRA - Conteúdo relativo de água
AO - Ajustamento osmótico
IEE - Índice de extravasamento de eletrólitos
IRGA - Analisador Portátil de Gás Infravermelho
EUA - Eficiência do uso da água
EIC - Eficiência instantânea de carboxilação
AcSi - Acúmulo de silício

CAPÍTULO III

MO - Matéria Orgânica

ADA - Argila Dispersa em Água

GF - Grau de Flocculação

Ds - Densidade do Solo

Dp - Densidade de Partícula

SB - Soma de Bases

CTC - Capacidade de Troca Catiônica

Vc - Saturação por Base

TFSA - Terra Fina Seca ao Ar

CRAS - Curva de Retenção de Água no Solo

ETc - Evapotranspiração da Cultura

AO - Ajustamento Osmótico

MSF - Massa seca da folha

MSC - Massa seca do colmo

MSPA - Massa seca da parte aérea

EUC - Eficiência de Uso de Carbono

EUN - Eficiência de Uso de Nitrogênio

EUP - Eficiência de Uso de Fósforo

FSA - Fertilizante de Sílica Amorfa

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO II

Si - Silício

θ_{CC} - Umidade na Capacidade de Campo

θ_{PMP} - Umidade no Ponto de Murcha Permanente

Ψ_w - Potencial hídrico foliar

Ψ_o - Potencial osmótico

A - Fotossíntese líquida

G_s - Condutância estomática

E - Taxa de transpiração

C_i - Concentração intracelular de CO₂

F_o - Fluorescência inicial

F_m - Fluorescência máxima

F_v - Fluorescência variável

F_v/F_m - Eficiência quântica do fotossistema II

Chl a - Clorofila a

Chl b - Clorofila b

Chl a + b - Clorofila total

CAPÍTULO III

θ_{CC} - Umidade na Capacidade de Campo

θ_{PMP} - Umidade no Ponto de Murcha Permanente

Ψ_w - Potencial Hídrico Foliar

Si - Silício

C - Carbono

N - Nitrogênio

P - Fósforo

SUMÁRIO

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES E REVISÃO DE LITERATURA.....	21
1. INTRODUÇÃO GERAL	21
2. OBJETIVOS	23
2.1 Objetivo Geral	23
2.2 Objetivos Específicos.....	23
3. HIPÓTESES	24
4. REVISÃO DE LITERATURA	24
4.1 Aspectos gerais da cultura da cana-de-açúcar	24
4.2 Cultivo da cana-de-açúcar em sistema irrigado	26
4.3 Danos do déficit hídrico em cana-de-açúcar	27
4.4 Silício como mitigador de déficit hídrico em cana-de-açúcar.....	30
4.5 Silício biodisponível no solo para as plantas	33
4.6 Fertilizante de sílica amorfa (FSA) na oferta de Si disponível	36
5. REFERÊNCIAS	37
CAPÍTULO II: APLICAÇÃO DE SILÍCIO NA FORMA DE SÍLICA AMORFA NO CRESCIMENTO, RELAÇÕES HÍDRICAS E PERFORMANCE FOTOSSINTÉTICA DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB ESTRESSE HÍDRICO	50
RESUMO.....	50
ABSTRACT	51
1. INTRODUÇÃO	52
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	54
2.1 Condições de cultivo e material vegetal.....	54
2.2 Tratamentos e delineamento experimental.....	58
2.3 Sistema de irrigação e manejo da água	59
2.4 Variáveis avaliadas	62
2.4.1 Altura do colmo, diâmetro do colmo, número de folhas verdes, número de perfilhos, percentual de folhas secas e área foliar	62
2.4.2 Produção de massa seca.....	63

2.4.3	Conteúdo relativo de água	63
2.4.4	Potencial hídrico foliar	63
2.4.5	Potencial osmótico.....	63
2.4.6	Ajustamento osmótico	64
2.4.7	Índice de extravasamento de eletrólitos.....	64
2.4.8	Fluorescência da Clorofila.....	65
2.4.9	Índice de SPAD, conteúdo de clorofila e carotenoides.....	65
2.4.10	Trocas gasosas foliares	65
2.4.11	Análise de silício (Si).....	66
2.5	Análise estatística	66
3.	RESULTADOS.....	67
4.	DISCUSSÃO	81
5.	CONCLUSÕES.....	87
6.	REFERÊNCIAS	87
CAPÍTULO III: HOMEOSTASE ESTEQUIOMÉTRICA E ESTADO NUTRICIONAL EM CANA-DE-AÇÚCAR SOB DÉFICIT HÍDRICO E APLICAÇÃO DE SÍLICA AMORFA BIOGÊNICA		
	RESUMO.....	95
	ABSTRACT	96
1.	INTRODUÇÃO	97
2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	99
2.1	Condições de cultivo e material vegetal.....	99
2.2	Tratamentos e delineamento experimental.....	103
2.3	Sistema de irrigação e manejo da água	104
2.4	Variáveis avaliadas	107
2.4.1	Potencial hídrico foliar	107
2.4.2	Ajustamento osmótico	107
2.4.3	Conteúdo de silício	108
2.4.4	Conteúdo de carbono, nitrogênio e fósforo	108
2.4.5	Razões estequiométricas Silício: Carbono: Nitrogênio: Fósforo	109
2.4.6	Eficiências de uso de carbono, nitrogênio e fósforo.....	109

2.4.7 Produção de massa seca.....	109
2.5 Análise estatística	109
3. RESULTADOS.....	110
3.1 Potencial hídrico foliar e ajustamento osmótico	110
3.2 Conteúdo de silício, carbono, nitrogênio e fósforo em folhas e colmos	111
3.3 Razões estequiométricas de C:Si, C:N, C:P e N:P em folhas e colmos	114
3.4 Eficiência de uso de C, N, P e produção de matéria seca.....	117
3.5 Análise multivariada.....	121
3.5.1 Análise hierárquica de cluster.....	121
4. DISCUSSÃO	122
5. CONCLUSÕES.....	129
6. REFERÊNCIAS	129

CAPÍTULO I

**INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES
E REVISÃO DE LITERATURA**

CAPÍTULO I: Introdução geral, objetivos, hipóteses e revisão de literatura

1. INTRODUÇÃO GERAL

O setor sucroenergético é responsável pelo amplo cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) no Brasil. Esta espécie apresenta altas concentrações de sacarose, sendo amplamente utilizada para a produção de açúcar, biocombustível e etanol (DE OLIVEIRA FILHO et al., 2021). Este último tem permitido que o Brasil reduza em mais da metade o consumo de gasolina automotiva nacional (CARPIO e SOUZA, 2017).

No Brasil, atualmente, a área de cultivo de cana-de-açúcar equipada para irrigação (incluindo irrigação e fertirrigação) abrange 3,6 milhões de hectares (ANA, 2021), representando cerca de 43,7% de toda a área cultivada com a espécie, que totaliza 8,3 milhões de hectares (CONAB, 2023). No entanto, a prática da irrigação com água doce na cultura da cana-de-açúcar no país ainda é uma tecnologia relativamente recente, com apenas 9,0% do total da área cultivada. É importante destacar que a área dedicada ao cultivo da cana-de-açúcar em sequeiro corresponde ainda a um montante de 56,3% da área total (ANA, 2021).

Atualmente tem-se observado a expansão da área de cultivo com cana-de-açúcar para regiões onde a umidade do solo é insuficiente, com isso a cultura tem enfrentado diversos níveis de estresse hídrico durante seu desenvolvimento (VERMA et al., 2021; VERMA et al., 2020). Em condições de campo, regiões marginais com problemas de déficit hídrico podem atingir 35,0% da capacidade de retenção de água do solo (DE WRACHIEN; SCHULTZ; GOLI, 2021) e causar uma diminuição significativa na produtividade da cana-de-açúcar (COSTA et al., 2023). Portanto, quando a escassez de água ocorre durante o período crítico, que compreende a fase II (perfilhamento e alongamento do colmo), as reduções no rendimento da cultura são ainda mais significativas, com impactos negativos na produtividade de colmos e açúcar.

Os efeitos causados pelo déficit hídrico em cana-de-açúcar são de grande importância, uma vez que se trata de uma espécie semi-perene que permanece no campo durante todas as estações climáticas, inclusive em épocas de menor pluviosidade (BASNAYAKE et al., 2012). Além disso, o plantio ocorre em quase todas as épocas do ano, expondo as plantas à seca em fases iniciais do seu crescimento. Na região Nordeste, esse período de exposição ao déficit hídrico pode durar até 8 meses, o que reduz significativamente o potencial produtivo da cultura.

Nesse contexto, as áreas com cultivo irrigado devem priorizar os manejos agrícolas baseados no uso racional da água, que é um recurso finito (CARDOZO; BORDONAL; SCALA, 2018). Isso é relevante para a agricultura irrigada, considerando que a agricultura

consome aproximadamente 69,0% dos 2,5% do total de água doce do mundo, destacando a necessidade urgente de promover o uso sustentável desse recurso (TAYADE et al., 2023).

Um dos manejos agrícolas que têm trazido benefícios para a cana-de-açúcar cultivada em solos com baixa disponibilidade de água é a irrigação deficitária. Quando essa prática é associada à aplicação de Si, o impacto do déficit hídrico é reduzido e a produtividade da cana-de-açúcar aumenta. Para que essa prática seja eficaz, é essencial selecionar uma fonte de Si que apresente alta solubilidade e disponibilidade, além de ser livre de contaminantes (MILLS-IBIBOFORI et al., 2019). No entanto, estudos em cana-de-açúcar frequentemente utilizam fontes de Si de baixa solubilidade, como silicatos de cálcio, que exigem altas doses (até 1000 kg ha⁻¹ de Si) para serem incorporadas ao solo, visando melhorar sua dissolução (DE CAMARGO et al., 2017; BEZERRA et al., 2019; CAMARGO et al., 2023).

Nesse contexto o uso da sílica amorfa, um fertilizante natural de Si, com maior solubilidade do que outras fontes, como escória e silicatos de Ca, Mg e K (NASCIMENTO et al., 2021), têm-se mostrado uma fonte promissora em ofertar Si disponível como mostra alguns estudos em cana-de-açúcar (OLIVA et al., 2020; OLIVA et al., 2021; NASCIMENTO et al., 2021), outro benefício que justifica a utilização dessa fonte em ambientes com restrição hídrica é devido essa fonte também contribuir para a aumentar a retenção de água no solo (PATI et al., 2016; SANDHYA e PRAKASH, 2019).

É importante destacar que o poder acumulativo de Si nas plantas depende da concentração de Si no solo, disponibilidade de água e suas interações (OLIVERA-VICIEDO et al., 2024). As respostas das plantas de cana-de-açúcar ao Si após a absorção começam com processos de biossilicificação e acúmulo nos tecidos vegetais, interagindo posteriormente com componentes nutricionais vitais para o crescimento e desenvolvimento da espécie, tais como carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P) (COSTA et al., 2023).

Portanto, pode-se inferir que os benefícios do Si na fisiologia da cana-de-açúcar são atribuídos ao seu efeito na manutenção do equilíbrio homeostático de C:N:P, pois estes nutrientes desempenham um papel crucial na função estrutural, participando em numerosos compostos orgânicos essenciais para o desenvolvimento e a produtividade da cana-de-açúcar (COSTA et al., 2024). Desta forma, o Si tem se mostrado eficaz na mitigação do estresse hídrico, contribuindo para o aumento da produtividade em cana-de-açúcar (DE CAMARGO et al., 2017).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar os efeitos de doses de Si, aplicadas na forma de sílica amorfa via solo, nas respostas de crescimento, relações hídricas, fisiológicas e nutricionais de plantas de cana-de-açúcar, cultivadas sob diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura - ETc) durante o período crítico de crescimento (60 a 150 dias após o plantio - DAP).

2.2 Objetivos Específicos

Avaliar as variáveis biométricas em altura do colmo, diâmetro do colmo, número de folhas verdes, número de perfilhos, percentual de folhas secas e área foliar aos 148 DAP, como também determinar o acúmulo de matéria seca no colmo, folhas e parte área aos 150 DAP em plantas de cana-de-açúcar.

Avaliar as relações hídricas em plantas de cana-de-açúcar através da determinação do conteúdo relativo de água (CRA), potencial hídrico foliar (Ψ_w), potencial osmótico (Ψ_o), ajustamento osmótico (AO) e índice de extravasamento de eletrólitos (IEE) aos 150 DAP.

Avaliar a performance fotossintética de plantas de cana-de-açúcar por meio de leituras de trocas gasosas, incluindo fotossíntese líquida (A), transpiração foliar (E), condutância estomática (Gs), concentração intracelular de CO₂ (Ci), eficiência instantânea de carboxilação (Eic) e eficiência do uso da água (EUA). Além disso, medir a fluorescência da clorofila a, considerando fluorescência inicial (Fo), máxima (Fm), variável (Fv) e eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm), aos 148 DAP.

Determinar os pigmentos fotossintéticos, incluindo clorofila a (Chl a), clorofila b (Chl b), carotenoides e leituras de SPAD (índice de SPAD) aos 148 DAP em plantas de cana-de-açúcar.

Quantificar a concentração (teor) e acúmulo, de silício (Si) carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P), e determinar as relações estequiométricas C:Si, C:N, C:P e N:P e eficiências do uso de C, N e P aos 150 DAP em plantas de cana-de-açúcar.

3. HIPÓTESES

A disponibilidade de água e a fonte de Si pode afetar a absorção de Si de diferentes maneiras quando isolados ou combinados.

O uso de Si em uma dose ótima pode melhorar a fisiologia da cana-de-açúcar, induzida pelo aumento do ajustamento osmótico que diminui o estresse por déficit hídrico e favorece o acúmulo de biomassa nas plantas.

O dano causado pelo déficit hídrico na produção de massa seca deve-se ao desequilíbrio da homeostase nutricional, que por sua vez diminui a eficiência de uso de C, N e P.

O fornecimento de Si a partir da fonte de sílica amorfa com alta solubilidade altera a dinâmica de absorção de carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P), otimizando o uso desses nutrientes, reduzindo a perda de biomassa vegetal e promovendo um desempenho superior da planta.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Aspectos gerais da cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea tropical da família Poaceae, originária do Sudeste Asiático (GONÇALVES et al., 2017). Pertence à classe Liliopsida, subclasse Commiliniidae, ordem Cyperales e gênero *Saccharum* (HITCHCOCK, 1923). É classificada como uma planta monocotiledônea, alógama e semiperene, seus atuais cultivares são híbridos interespecíficos, sendo que nas constituições genéticas participam as espécies *S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinense*, *S. barberi*, *S. robustum* e *S. edule* (GUPTA et al., 2010).

A espécie *Saccharum officinarum* L. é reconhecida como uma das culturas mais importantes em termos econômicos mundialmente, apresentando valor econômico, social e ambiental significativo nos países onde é cultivada (DALRI et al., 2021; WU et al., 2022). No contexto mundial, o Brasil assume uma posição proeminente como o maior produtor da espécie, registrando uma produção expressiva de 757,1 milhões de toneladas em 2020, representando aproximadamente 38,2% da produção mundial, seguido por países como Índia, China, Paquistão e Tailândia (FAOSTAT, 2020).

As regiões brasileiras mais relevantes na produção de cana-de-açúcar são o Sudeste e o Centro-Oeste, responsáveis por 519,1 milhões de toneladas na safra 2022/23, correspondendo a 85,0% da produção nacional, com destaque para os estados de São Paulo (51,2%), Goiás (11,6%), Minas Gerais (11,5%), Mato Grosso do Sul (7,3%) e Paraná (5,1%) (CONAB, 2023).

Historicamente, a região Nordeste do Brasil desempenha um papel significativo na produção de cana-de-açúcar, sendo uma cultura de destaque. Em 2023, a área cultivada na região atingiu 875,5 mil hectares, com a produção concentrada principalmente nos estados de Alagoas e Pernambuco, que juntos somaram 20,2 e 14,7 milhões de toneladas, respectivamente (CONAB, 2023).

O cultivo da cana-de-açúcar vem se expandindo no mundo devido ao crescimento da demanda por açúcar, subprodutos e uso da cultura como fonte de bioenergia, incluindo etanol de primeira e segunda geração, bem como bioeletricidade (BASNAYAKE et al., 2015; BEZERRA et al., 2019; CHERUBIN et al., 2021). Dentre os subprodutos obtidos a partir da cana-de-açúcar, destaca-se a vinhaça, que têm contribuído para a melhoria do teor de carbono do solo, funcionando como fonte orgânica de nutrientes essenciais, como potássio (K), enxofre (S) e cálcio (Ca) (DOS SANTOS et al., 2020).

No Brasil, além do uso da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e subprodutos como a vinhaça, a expansão das áreas cultivadas com a espécie nos últimos anos se deve à aceitação do etanol pelos veículos com tecnologia flex-fuel, proporcionando benefícios ambientais e socioeconômicos ao substituir parcialmente a gasolina (ANTUNES et al., 2019). De acordo com projeções mundiais, a produção anual de etanol deve aumentar de aproximadamente 100 bilhões de litros para quase 134,5 bilhões de litros até 2028 (OCDE/FAO, 2019). Dois terços desse aumento na demanda são previstos para serem supridos pela cana-de-açúcar produzida no Brasil (CHERUBIN et al., 2021).

Devido à crescente demanda por etanol, a expansão da cana-de-açúcar no Brasil está se dando em regiões "não tradicionais", caracterizadas por solos de baixa fertilidade, principalmente em áreas de pastagens degradadas (ANTUNES et al., 2019; CURSI et al., 2022), e com ocorrência de deficiência hídrica. Esses fatores têm contribuído para baixas produtividades da cana-de-açúcar. Portanto, são necessários avanços em estudos que possam implementar manejos de irrigação deficitários associados ao uso de Si, visando promover melhor produtividade e sustentabilidade para a cultura da cana-de-açúcar nessas regiões "não tradicionais". Além disso, as regiões Norte e Nordeste, que normalmente apresentam uma média de produtividade muito aquém do potencial teórico da cultura, também se beneficiariam dessas práticas (CURSI et al., 2022).

4.2 Cultivo da cana-de-açúcar em sistema irrigado

A água desempenha um papel crucial no desenvolvimento das plantas, seja proveniente da chuva ou da irrigação (ROSSETTO et al., 2022). No cultivo da cana-de-açúcar, as exigências hídricas variam conforme o estágio fenológico da planta e são influenciadas por fatores como o manejo agrícola, o clima e a cultivar utilizada (MACHADO et al., 2009; DALRI et al., 2021). Apesar disso, o uso da irrigação na cana-de-açúcar no Brasil ainda é uma prática recente, abrangendo apenas cerca de 10% da área cultivada (MARIN et al., 2020).

Para completar seu ciclo a cana-de-açúcar requer grandes volumes de água para atingir sua máxima produtividade, variando de água de 1.500 a 2.500 mm ao ano, distribuídas uniformemente ao longo da estação de cultivo (FAO, 2021). Estima-se que para produzir 1 kg de cana-de-açúcar sejam necessários cerca de 125 litros de água (SINGH, VERMA; SRIVASTAVA, 2018).

Diante da exigência da cana-de-açúcar por grandes volumes de água, surge as preocupações ambientais com a escassez de água (SCARPARE et al., 2016), principalmente em países onde a expansão da cultura depende exclusivamente da irrigação (MARTIN et al., 2007). No Brasil, os sistemas de produção agrícola para a cana-de-açúcar estão em sua maior parte em condições não irrigadas (LEAL et al., 2017), isso se deve devido as condições climáticas favoráveis para o desenvolvimento da cultura sem irrigação nas principais regiões produtoras do país (ANA, 2021).

A crescente expansão do cultivo da cana-de-açúcar em ambientes caracterizados por altas temperaturas, solos arenosos e com baixos índices pluviométricos é um fenômeno que tende a impulsionar o uso da irrigação, especialmente em novas áreas de expansão (WALTER et al., 2016). Neste sentido, é pertinente aprimorar novas práticas agrícolas que gerem maior eficiência na irrigação e maiores produtividades, principalmente em culturas com alta demanda hídrica como a cana-de-açúcar, tornando sua produção sustentável (SINGH; VERMA; SRIVASTAVA, 2018). Porém, em áreas com menores restrições hídricas, o uso da irrigação também tem sido utilizado com o objetivo de aumentar a produtividade das culturas (CARDOZO; BORDONAL; SCALA, 2018).

Diversos estudos no Brasil mostram que a irrigação em cana-de-açúcar aumenta a produtividade da cultura em relação às lavouras não irrigadas, conforme verificado por Oliveira et al. (2011) no Nordeste, Pires et al. (2014) no Sudeste e Bastos et al. (2015) no Centro-Oeste. Isso ocorre porque a água desempenha um papel significativo no metabolismo da planta e sua indisponibilidade no solo gera uma redução no potencial hídrico foliar, que diminui as

trocas gasosas e afeta negativamente a assimilação de CO₂ nos cloroplastos, limitando o desenvolvimento da cultura (TAIZ e ZEIGER, 2013). Neste sentido, a irrigação exerce benefícios diretos para as lavouras de cana-de-açúcar que inclui principalmente no aumento do rendimento agrícola (COSTA; SAAD; SILVA JUNIOR, 2016).

Na região nordeste do Brasil em muitas áreas cultivadas com cana-de-açúcar ainda é realizada a chamada “irrigação com economia de água” programação local que consiste na aplicação de uma ou duas lâminas de irrigação de 60 mm: a primeira logo após o plantio ou colheita e a segunda 30 dias após a aplicação anterior (RESENDE et al., 2022).

Uma estratégia de manejo de irrigação com economia de água bem conhecida é a irrigação deficitária que envolve a aplicação de uma porção reduzida da água necessária durante fases críticas do ciclo de cultivo da cultura (DIAS e SENTELHAS, 2018), essa aplicação de água é feita abaixo da demanda de evapotranspiração (ET), resultando em uma otimização da produção econômica em situações de escassez hídrica (PEREIRA; CORDERY; IACOVIDES, 2012; CHAI et al., 2016).

Devido às mudanças climáticas e ao clima imprevisível, causa das crises hídricas, diversos pesquisadores ao redor do mundo têm se dedicado a encontrar maneiras de aumentar a produção de alimentos com um consumo mínimo de água, principalmente em regiões que enfrentam escassez hídrica (DENG et al., 2006; DESHMUKH; MA; BÉLANGER, 2017; ABYANEH; JOVZI; ALBAJI, 2017; YANG et al., 2020).

Em cana-de-açúcar as irrigações deficitárias aplicadas na cultura podem reduzir a lâmina total de água utilizada para valores entre 500 e 750 mm durante os períodos mais secos do ciclo de produção, evidenciando a viabilidade e sustentabilidade dessa abordagem na gestão hídrica da cana-de-açúcar (DIAS e SENTELHAS, 2018).

4.3 Danos do déficit hídrico em cana-de-açúcar

O déficit hídrico é um dos estresses abióticos mais danosos que ameaçam a produção agrícola em todo o mundo (WANG et al., 2022). É considerado também como um dos mais comuns e é capaz de reduzir a produtividade das principais culturas de 50% a 80% (BUCHANAN; GRUISSEM; JONES, 2015; GRIFFITHS e PAUL, 2017). Esses efeitos têm se intensificado devido às mudanças climáticas, expondo os cultivos agrícolas a recursos hídricos cada vez mais escassos e a períodos prolongados de déficit hídrico (BESHARAT; BARÃO; CRUZ, 2020).

O desenvolvimento da cana-planta é dividido em quatro fases: germinação e estabelecimento, perfilhamento e alongamento do colmo, grande crescimento e maturação (SOM-ARD et al., 2021). As quatro fases fenológicas são mostradas na Figura 1.

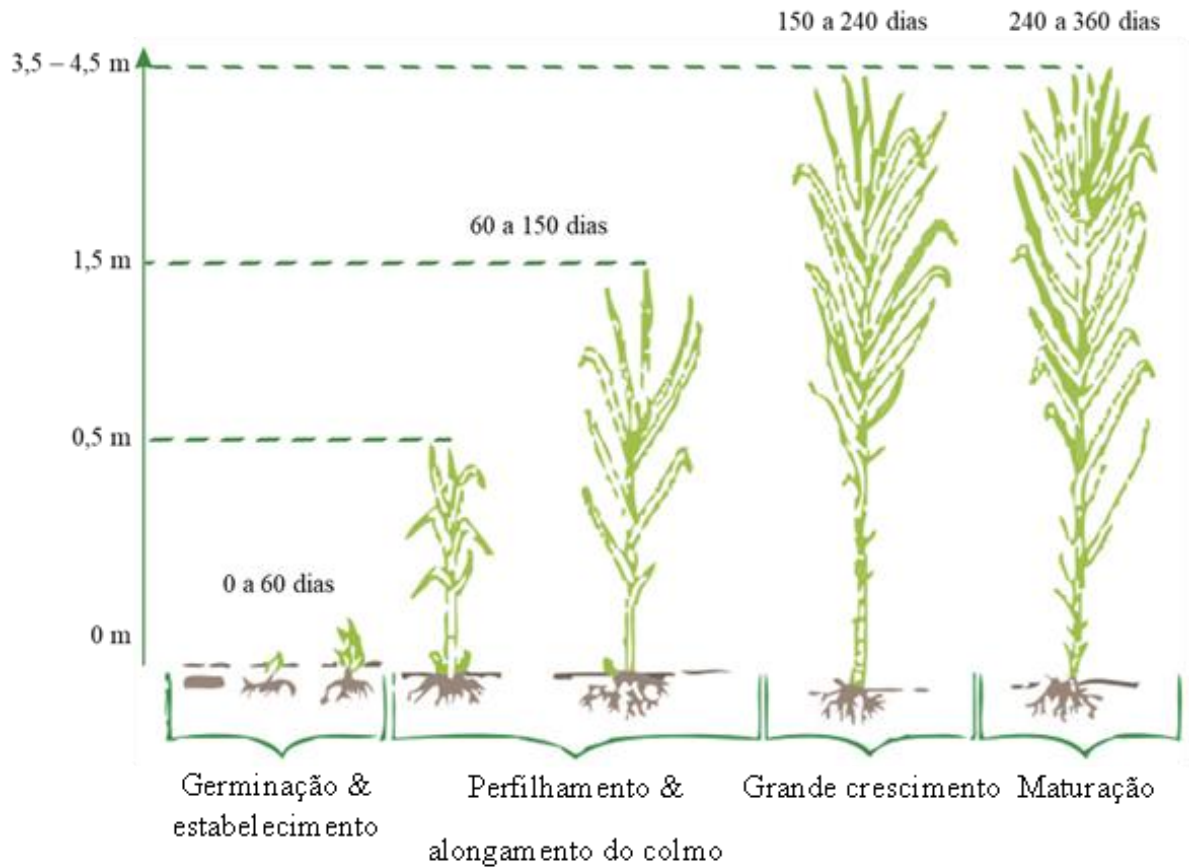


Figura 1. Fases fenológicas da cana-de-açúcar e seus respectivos períodos em dias, bem como alturas indicativas e geometrias das plantas. Adaptado e modificado de Molijn et al. (2019).

Os danos causados pelo déficit hídrico são significativos para o cultivo da cana-de-açúcar, uma vez que se trata de uma espécie semi-perene que permanece no campo durante todas as estações climáticas, com plantios ocorrendo em quase todos os períodos do ano (BASNAYAKE et al., 2012). Essa condição adversa resulta em estresse oxidativo para as plantas, comprometendo o potencial produtivo da espécie, por desencadear reduções de aproximadamente 70% do seu rendimento (DIAS e SENTELHAS, 2018). Esse impacto é mais proeminente quando o déficit hídrico ocorre em fases críticas como o perfilhamento e o alongamento do colmo (60 – 150 dias) (INMAN-BAMBER e SMITH, 2005; SOM-ARD et al.,

2021), sendo o crescimento do colmo e das folhas mais afetado do que outros órgãos (RAMESH, 2000; MACHADO et al., 2009).

As respostas mais comuns no crescimento da cana-de-açúcar ao déficit hídrico incluem enrolamento das folhas, inibição do crescimento do colmo e das folhas, senescência foliar e redução da área foliar (INMAN-BAMBER e SMITH, 2005; INMAN-BAMBER et al., 2012), decorrentes da diminuição do teor de água da planta (TEIXEIRA et al., 2020), resultando em menor crescimento da parte aérea e redução na produtividade (SOM-ARD et al., 2021). Porém, esses efeitos causados pelo déficit hídrico no crescimento da cana-de-açúcar variam de acordo com a variedade, o órgão afetado, a intensidade do déficit hídrico (severo ou moderado) e a duração (rápida ou gradual) (GRAÇA et al., 2010; INMAN-BAMBER; LAKSHMANAN; PARK, 2012; FERREIRA et al., 2017; COSTA et al., 2022).

Na fisiologia essas respostas do déficit hídrico provocam diminuição do potencial hídrico foliar (OLIVEIRA FILHO et al., 2021), desequilíbrio no ajuste osmótico (PEI et al., 2010) causado pelo fechamento estomático que diminui o influxo de CO₂ foliar, limitando a carboxilação e os níveis internos de CO₂ (PINHEIRO e CHAVES, 2011). Essa menor difusão de CO₂ do ambiente para o local de carboxilação é considerada a principal razão por trás da diminuição da taxa fotossintética durante o déficit hídrico (RAZI e MUNEER, 2021).

Outras consequências do déficit hídrico estão relacionadas aos aumentos excessivos das espécies reativas de oxigênio (EROs) que compreendem os íons de oxigênio (ânion superóxido O₂⁻), peróxidos (peróxido de hidrogênio H₂O₂) e radicais livres (radical hidroxila OH) (KIM et al., 2017), que em níveis elevados causam danos oxidativos a proteínas, DNA e lipídios dos componentes celulares (APEL e HIRT, 2004; SCHIEBER e CHANDEL, 2014; TRIPATHI et al., 2017).

Estudos mais recentes com cana-de-açúcar indicaram que o déficit hídrico também afeta a homeostase estequiométrica do C:N:P, diminuindo as razões C:N e C:P refletindo na redução da produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes nos colmos; devido a desequilíbrios nutricionais, que tem como consequência menor eficiência de uso desses nutrientes (DE OLIVEIRA FILHO et al., 2021; COSTA et al., 2022), uma vez que esses nutrientes estão fortemente associados às funções bioquímicas e fisiológicas da cana-de-açúcar (VICIEDO et al., 2019).

Nesse sentido, acredita-se que o uso de uma fonte inovadora de Si pode proporcionar resultados que favoreçam de forma mais intensa os resultados obtidos em cana-planta sob déficit hídrico, especialmente com a aplicação de uma dose ótima de Si. Considerando que no Brasil, ainda não há uma recomendação estabelecida e amplamente aceita para uma dose ótima

de Si visando amenizar os efeitos do déficit hídrico em cana-de-açúcar. Diante disso, estudos recentes têm sido intensificados para identificar quais variedades de cana-de-açúcar toleram melhor a seca, a partir da compreensão dos mecanismos pelos quais essa espécie lida com a restrição hídrica, considerando as alterações fisiológicas, bioquímicas, nutricionais e de crescimento (DE CAMARGO et al., 2019; OLIVEIRA FILHO et al., 2021; SOUZA JÚNIOR et al., 2022). Esses estudos buscam explorar o papel do Si na melhoria da tolerância ao estresse hídrico.

4.4 Silício como mitigador de déficit hídrico em cana-de-açúcar

A essencialidade do Si como nutriente só foi reconhecida para diatomáceas, juncos e outros membros das algas douradas (EPSTEIN, 2009). Sua essencialidade para plantas superiores ainda se mantém questionável devido à falta de evidências desvendando o papel direto do Si no metabolismo das plantas e na produção de compostos orgânicos contendo Si (MA et al., 2001; RICHMOND e SUSSMAN, 2003). Portanto, em plantas superiores o Si é um elemento benéfico, particularmente sob condições estressantes (HAYNES, 2017). Nesse sentido, os estudos já confirmam que a baixa quantidade de Si disponível tem provocado várias disfunções no crescimento e desenvolvimento das plantas (CHAKMA et al., 2021), fator que torna este elemento "quase essencial" (MORAES et al., 2022).

Os estudos indicam um maior uso de Si por plantas acumuladoras, como a cana-de-açúcar, que pode acumular mais de 1,0% de Si com base na matéria seca (TUBANA, BABU e DATNOFF, 2016; TEIXEIRA et al., 2022a), tornando essa espécie a segunda cultura mais responsiva ao Si (LIANG et al., 2015). No entanto, é importante salientar que as concentrações de Si nessa cultura variam de acordo com a variedade, disponibilidade de água no solo, taxa de transpiração, fonte de Si utilizada e características do solo (CAMARGO; KORNDÖRFER; WYLER, 2014; CAMARGO e KEEPING, 2021; HAYNES, 2017).

O Si regula a transpiração de água nos estômatos e cutícula ao ser depositado como sílica amorfa hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) nas paredes celulares, preenchendo os lúmens celulares e os espaços intercelulares (PRYCHID et al., 2003), formando os fitólitos de sílica (PIPERNO, 2006), que funcionam como barreira física para evitar a perda de água por transpiração (RAVEN, 2003; NAWAZ et al., 2019). Essa barreira física ajuda a preservar o fluxo de água no xilema (COSKUN et al., 2016; IRFAN et al., 2023), mantendo assim os níveis elevados de água nas células, que vão garantir a sobrevivência da planta (ZHANG et al., 2013).

Porém, em alguns estudos foi demonstrado que o Si pode aumentar a transpiração. Esse resultado pode ser atribuído a dois motivos principais. Primeiro, o acúmulo de osmólitos nas células-guarda mantendo os estômatos abertos, aumentando consequentemente a densidade estomática e a transpiração. Em segundo lugar, a maior capacidade de transporte e absorção de água proporcionada pelo Si também contribui para garantir água suficiente para manter a transpiração. Além disso, o acúmulo de fitólitos nas células bulbiformes fortalece seu papel como reservatório de água (WANG et al., 2021f) (Figura 2).

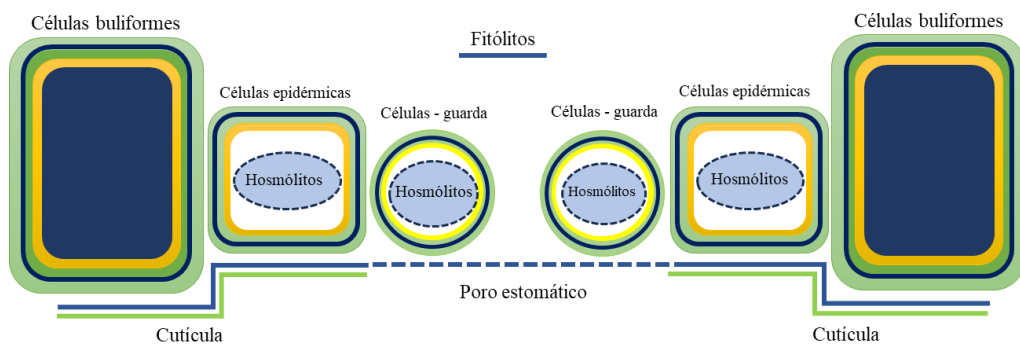


Figura 2. Efeito do Si na perda de água foliar por transpiração.

Nesse contexto, o Si, auxilia as plantas em várias vias metabólicas essenciais (MUKARRAM et al., 2022), compreendendo as relações hídricas, com o aumento do teor relativo de água e do potencial hídrico de tecidos (DE CAMARGO et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2020; TEIXEIRA et al., 2021d), favorecendo o ajuste osmótico em condição de déficit hídrico, que resulta em maior biomassa total (BEZERRA et al., 2019). É importante ressaltar que o ajuste osmótico se destaca como um dos mecanismos fisiológicos mais eficazes para manter o turgor celular (COSTA et al., 2024).

A relação água-planta sob déficit hídrico induzida por Si tem sido associada à melhoria da eficiência intrínseca do uso da água (FAROOQ et al., 2009; KAYA; TUNA; HIGGS, 2006). O Si ao melhorar a eficiência de uso da água (FREW et al., 2018), evita o estresse oxidativo ao diminuir o extravasamento de eletrólitos nas células (BEZERRA et al., 2019), resposta que proporciona uma maior eficiência quântica do PS II (TEIXEIRA et al., 2020).

As plantas perdem água através dos estômatos e da cutícula para as trocas gasosas com o meio ambiente (IRFAN et al., 2023). Aproximadamente 90% da água absorvida pelas raízes é dissipada através da transpiração (CHAVARRIA e SANTOS, 2012). O Si sustenta a fotossíntese e a transpiração normais das plantas sob mudanças ambientais (RASTOGI et al.,

2021), regulando os processos fisiológicos através da fotossíntese e da transpiração para aliviar os efeitos do estresse nas plantas (XU et al., 2023).

Em cana-de-açúcar sob condições de déficit hídrico foi comprovado que o Si aumentou a biomassa do sistema radicular nas fases iniciais de crescimento como: germinação e estabelecimento, perfilhamento e alongamento do colmo (TEIXEIRA et al., 2020; TEIXEIRA; MELLO PRADO; ROCHA et al., 2021c; TEIXEIRA et al., 2022b), e maturação (CAMARGO et al., 2023). Um sistema radicular profundo e grande permite que as plantas absorvam mais água das camadas mais profundas do solo (DIETRICH et al., 2017). Nesse contexto, o Si tem contribuído aumentando a absorção de água pelas raízes, especialmente em condições de déficit hídrico, devido sua capacidade de aumenta a área total de absorção de água das raízes (SONOBE et al., 2010; CAO et al., 2017).

O Si na cana-de-açúcar ao ser absorvido pelas raízes na forma de ácido monossilícico passa a ser parte integrante das paredes celulares e tem papel semelhante à lignina, proporcionando rigidez as paredes celulares, conferindo resistência estrutural à planta; esse aumento da resistência mecânica também melhora a postura de recepção de luz da planta (MISRA et al., 2023), com isso, as folhas tornam-se verdes escuras, rígidas e de envelhecimento lento, aumentando seu potencial de fotossíntese e, portanto, de crescimento (EPSTEIN, 1994).

Na nutrição da cana-de-açúcar, a aplicação de Si sob condições de déficit leva a modificações estequiométricas de C, N e P nos tecidos vegetais (COSTA et al., 2024). Essas mudanças são evidenciadas nas concentrações de nutrientes presentes nas folhas e colmos (TEIXEIRA et al., 2022a). Predominantemente, o Si se acumula nas paredes celulares da cana-de-açúcar, na forma de sílica amorfa (NEETHIRAJAN; GORDON; WANG, 2009) e em complexos orgânicos com celulose (YOSHIDA, 1965) e hemicelulose (HE; MA; WANG, 2015).

A formação destes compostos sílico-orgânicos, que contêm Si precipitado nos tecidos foliares, desempenha um papel funcional semelhante ao da lignina, mas com um custo energético consideravelmente menor (RAVEN, 1983). Esse processo resulta na redução do teor de carbono nas paredes celulares, alterando a razão estequiométrica C:Si, principalmente em condições de déficit hídrico (ROCHA et al., 2021). Dessa forma, o Si contribui para a atenuação dos efeitos negativos do déficit hídrico, promovendo a homeostase estequiométrica elementar, que abrange não apenas o C, mas também os nutrientes estruturais N e P. Isso favorece o equilíbrio nutricional nas plantas, aumentando a eficiência na utilização dos nutrientes.

Um dos mecanismos pelos quais o Si mantém o equilíbrio homeostático de C:N:P é aumentando a assimilação de C, que ocorre devido à preservação da integridade dos pigmentos fotossintéticos (COSTA et al., 2024). O Si aumenta a área superficial das plantas, promovendo aumento na absorção de água e nutrientes (WANG et al., 2021e), especialmente o P, que possui baixa mobilidade (COSTA et al., 2024). Tais modificações estequiométricas C:N:P melhoraram a eficiência nutricional e a produção de massa seca de plantas jovens de cana-de-açúcar cultivadas por períodos de 30 dias após o transplântio (DAT) (TEIXEIRA et al., 2020), 80 DAT (OLIVEIRA FILHO et al., 2021), 125 DAT (SOUZA JÚNIOR et al., 2022) e 150 DAT (COSTA et al., 2022) sob condições de déficit hídrico.

A ciência sobre o uso do Si é bem documentada e abrangente. No entanto, mesmo com esse robusto corpo de informações, o Si ainda não é utilizado de forma rotineira para amenizar o estresse abióticos em plantas (ZELLNER et al., 2021). Na cana-de-açúcar, uma das maiores limitações para a recomendação de Si via solo é identificar a dose ótima de Si que maximize a tolerância da cultura ao déficit hídrico.

Muitos fertilizantes silicatados possuem altos teores de Si total, mas nem todo o Si presente nesses fertilizantes está em uma forma que pode ser facilmente absorvido pelas plantas. Nesse contexto, os fertilizantes à base de sílica amorfa se destacam como uma excelente fonte de Si disponível, devido à sua maior solubilidade em comparação com fertilizantes de silicato de cálcio e escórias (PATI et al., 2016). Essa característica permite a utilização de menores doses do fertilizante, melhorando a relação custo-benefício. Além disso, as doses por área podem ser otimizadas ao determinar a dose ideal de Si, garantindo uma absorção eficiente do elemento pelas plantas e minimizando os impactos ambientais.

4.5 Silício biodisponível no solo para as plantas

O Si é considerado o segundo elemento com maior abundância, constituindo cerca de 28% da crosta terrestre e 0,03% da biosfera, mas sua biodisponibilidade no solo depende de sua ciclagem biogeoquímica, forma mineral e solubilidade (SOMMER et al., 2006; IMTIAZ et al., 2016; DESHMUKH; MA; BÉLANGER, 2017). Na crosta terrestre este elemento é encontrado quase unicamente na forma de dióxido de silício (SiO_2) em associação com uma ampla gama de minerais contendo Si em fases cristalinas, pouco cristalinas e amorfas (SOMMER et al., 2006).

Nos solos das regiões tropicais, mesmo com abundância de Si (CAMARGO; KORNDÖRFER; WYLER, 2014; HAYNES, 2017; CAMARGO e KEEPING, 2021), sua concentração disponível na solução do solo é limitada, apresentando baixos teores ($\leq 20 \text{ mg kg}^{-1}$ de Si) (extrator de CaCl_2 0,01 M) (HAYNES, 2014), principalmente em Latossolos, Argissolos e Nitossolos, por apresentarem na sua composição mineralógica minerais do tipo 1:1 (NEVES et al., 2018; BÓCOLI et al., 2021; SOUZA JUNIOR et al., 2007), devido a um alto grau de intemperismo, baixo pH e alta taxa de dessilicação (lixiviação de Si), resultante da lixiviação intensa nesses solos (SOMMER et al., 2006; KEEPING, 2017). Outro fator que também contribui para a baixa biodisponibilidade do Si nos solos das regiões tropicais são as forças antrópicas, como a agricultura (DARMAWAN et al., 2006; CAUBET et al., 2020).

A fase líquida do SiO_2 está presente principalmente na solução do solo como ácidos silícicos compreendendo ácidos monossilícico, polissilícico e complexos, dos quais apenas o ácido monossilícico (H_4SiO_4) sem carga é absorvido pelas plantas (SHARMA et al., 2023). A concentração de H_4SiO_4 na solução do solo é influenciada por fatores como pH do solo, teores de argila, minerais, matéria orgânica e óxidos/hidróxidos de ferro e alumínio, que são indicadores da idade geológica do solo (TUBAÑA e HECKMAN, 2015). Para aumentar rapidamente a concentração de H_4SiO_4 na solução do solo, a aplicação de fertilizantes ricos em Si disponível tem se mostrado uma prática mais adequada, especialmente em áreas de cultivo intensivo onde os solos são naturalmente pobres em Si solúvel.

O Si nos solos é classificado em três fases principais: líquida, adsorvida e sólida, sendo a fase sólida a maior delas (MATICHENCOV e BOCHARNIKOVA, 2001; SAUER et al., 2006). Diferentemente das fases líquida e adsorvida, o Si na fase sólida contribui pouco para a rápida reposição do Si biodisponível na solução do solo (TUBANA, 2023). Na fase líquida, o Si é encontrado principalmente como H_4SiO_4 (ILER, 1979). O H_4SiO_4 , seja em solução ou adsorvido na fase sólida, é a forma mais importante para a absorção e nutrição das plantas (TUBANA, 2023).

A concentração de Si na forma de H_4SiO_4 na solução do solo varia de 0,09 a 23,4 mg L^{-1} , geralmente sendo inferior a 1 mmol L^{-1} , mas pode ser maior em solos com pH alto ($>7,0$) e naqueles que contêm carbonato de sódio (VOLKOVA 1980; KOVDA 1985). (VOLKOVA, 1980; KOVDA, 1985; SOMMER et al., 2006). Porém, concentrações elevadas de H_4SiO_4 na solução do solo podem desencadear a polimerização, um processo que resulta na formação de cadeias estáveis de múltiplas unidades de H_4SiO_4 (KNIGHT e KINRADE, 2001; WILLIAMS e CRERAR, 1985). Estudos indicam que, em concentrações acima de 3,0 mmol L^{-1} , o H_4SiO_4 tende a se polimerizar (BIRCHALL, 1995).

A biodisponibilidade de Si nos solos é controlada por três fatores principais: (i) a concentração de Si na solução do solo, (ii) a reserva de Si na fase sólida, que pode ser de origem minerogênica, pedogênica, biogênica, adsorvida ou proveniente de fertilizantes, e (iii) a capacidade do solo de adsorver ou reter Si (HAYNES, 2014; SCHALLER et al., 2021). Como esses fatores resultam de interações biogeoquímicas complexas e variam entre diferentes tipos de solo, compreender a disponibilidade de Si e sua absorção por plantas e outros organismos é um desafio significativo (SCHALLER e PUPPE, 2023).

Na verdade, não existe um procedimento padrão para avaliar o Si biodisponível em solos porque esses métodos foram desenvolvidos para plantas cultivadas em climas específicos, principalmente cana-de-açúcar e arroz em zonas subtropicais (SAUER et al. 2006; SCHALLER et al., 2021). Contudo, quantificar os níveis de Si biodisponível no solo ainda é um desafio para a agricultura (LIANG et al., 2015). Devido a isso, diferentes estudos muitas vezes apresentam resultados inconsistentes. Por exemplo, Crusciol et al. (2018) demonstraram que as correlações entre o Si disponível para plantas nos solos e as concentrações de Si na cana-de-açúcar variavam não apenas com a textura do solo, mas também com o tipo de extrator utilizado.

Os estudos demonstram que os extratores mais utilizados para avaliar o Si disponível nos solos são o cloreto de cálcio $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ e ácido acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, uma vez que as concentrações extraídas por esses reagentes são proporcionais à concentração de Si nas plantas (SAUER et al., 2006; CAUBET et al., 2020; MEIRELLES et al., 2023).

No Brasil níveis críticos de Si biodisponível foram identificados em solos tropicais cultivados com arroz (KORNDÖRFER et al., 2001). No entanto, para a cana-de-açúcar, esses níveis críticos ainda não foram definidos, devido à escassez de informações sobre a adubação com Si para essa cultura. Apesar disso, os resultados da fertilização com Si têm sido positivos em solos contendo de 1 a 8 mg kg^{-1} de Si, extraído com $0,01 \text{ mol L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ (KORNDÖRFER et al., 2004; OLIVA et al., 2020; OLIVA et al., 2021).

Estudos sobre a adubação de Si via solo em sistemas irrigados de cana-de-açúcar foram documentados por Camargo et al. (2023), Teixeira et al. (2021d), Oliveira Filho et al. (2021), Teixeira et al. (2022b), Teixeira et al. (2022a) e Da Silva et al., (2023). Devido aos baixos níveis de Si biodisponível, característica comum em solos tropicais intemperizados, a adubação com Si via solo tende a aumentar a disponibilidade deste elemento (MEYER e KEEPING, 2001). Nesse contexto, surge a necessidade de investigar a adubação com Si (ALI et al., 2020), utilizando doses adequadas para elevar o status de Si intracelular nas plantas (HAYNES, 2017), por meio de fontes que forneçam Si prontamente disponível.

4.6 Fertilizante de sílica amorfa (FSA) na oferta de Si disponível

A redução de H_4SiO_4 na solução do solo, seja por intemperismo ou através da remoção pelas culturas, desencadeia diversos processos no sistema do solo que visam repor o Si perdido e restabelecer o equilíbrio entre as fases líquida e sólida do Si (TUBANA; BABU; DATNOFF, 2016). Desta forma, uma maneira de repor imediatamente o Si perdido é através de uma fonte rica em Si disponível.

Há alguns anos, o Si foi reconhecido nos Estados Unidos como um nutriente benéfico (IPNI, 2015; NASCIMENTO et al., 2021), e já existem recomendações oficiais para o seu uso em alguns países, como Japão (LIANG et al., 2015) e Estados Unidos (TUBANA; BABU; DATNOFF, 2016). No entanto, no Brasil ainda não há recomendações específicas para a nutrição com Si. Recentemente, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) introduziu o Si como micronutriente por meio da Instrução Normativa N° 61, de 8 de julho de 2020. Essa medida permite que os produtores rurais utilizem o Si na agricultura, considerando os vários benefícios já comprovados desse elemento.

Ao selecionar uma fonte de Si é importante considerar sua solubilidade, disponibilidade, propriedades físicas e possíveis contaminantes (MILLS-IBIBOFORI et al., 2019). No Brasil, as fontes de Si mais utilizadas são provenientes da siderurgia, compostas principalmente por silicato de cálcio e magnésio, além de termofosfatos magnesianos (SOUSA; KORNDÖRFER; WANGEN, 2010). Em pesquisas com cana-de-açúcar, especialmente em condições de restrição hídrica, é comum o uso de silicatos de cálcio como fonte de Si, exigindo doses elevadas para garantir uma dissolução eficaz no solo (DE CAMARGO et al., 2017; BEZERRA et al., 2019; CAMARGO et al., 2023).

Nesse contexto, existe por parte da comunidade científica controvérsias sobre a eficácia das fontes convencionais em relação ao teor total de Si (KEEPING, 2017). Estudos comprovam que o teor total de Si de uma fonte, fornecimento de Si disponível e absorção pelas plantas não necessariamente coincidem (GASCHO, 2001; MCCRAY e JI, 2013; KEEPING, 2017). Desta forma, fica evidente que o mais importante é o teor de Si disponível da fonte utilizada (KEEPING, 2017). Assim, os pesquisadores sentiram a necessidade de avaliar algumas abordagens alternativas as fontes convencionais que ofereçam mais Si disponível para as plantas e promovam, maior absorção, transporte e acúmulo de Si nos tecidos vegetais (ASGARI et al., 2018).

Entre as fontes alternativas aplicadas via solo, os fertilizantes à base de sílica amorfa têm se destacado como uma opção sustentável para a suplementação de Si. Essa fonte é

produzida a partir de rochas sedimentares de origem biogênica a diatomita, constituídas por carapaças fósseis de algas diatomáceas e compostas predominantemente por sílica amorfa ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) (DA SILVA et al., 2023). A diatomita, em particular, apresenta uma solubilidade superior quando comparada a outras fontes de Si, como silicatos de cálcio e escórias, resultando em uma liberação mais rápida de Si para as plantas (NASCIMENTO et al., 2021). Além disso, a diatomita possui elevada capacidade de troca catiônica e retenção de água, devido à sua alta área superficial e porosidade (PATI et al., 2016; SANDHYA e PRAKASH, 2019). Essas características não são encontradas em outros fertilizantes silicatados, tornando a diatomita uma opção eficaz para melhorar a disponibilidade de Si no solo e potencializar o crescimento das plantas (PATI et al., 2016).

A reatividade no solo da diatomita aumenta à medida que o pH do solo aumenta, possibilitando maior disponibilidade de Si na faixa ideal (6,5-7,0) para maioria de plantas cultivadas. Experimentos com a cultura da cana-de-açúcar (OLIVA et al., 2020; OLIVA et al., 2021; NASCIMENTO et al., 2021) e melão (NASCIMENTO et al., 2019), demonstraram uma correlação com o aumento de Si disponível (extraído com CaCl_2) nos tecidos foliares a partir da aplicação de sílica amorfa. No entanto, o uso da sílica amorfa precisa ser mais explorado, pois ainda há pouca informação sobre a fertilização com Si no Brasil especialmente utilizando essa fonte como fertilizante de Si em comparação com outras fontes amplamente utilizadas.

5. REFERÊNCIAS

- ABYANEH, H. Z.; JOVZI, M.; ALBAJI, M. Effect of regulated deficit irrigation, partial root drying and N-fertilizer levels on sugar beet crop (*Beta vulgaris* L.). **Agricultural Water Management**, v. 194, p. 13-23, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.016>
- ALI, N. et al. The regulatory role of silicon in mitigating plant nutritional stresses. **Plants**, v. 9, p. 1779, 2020. <https://doi.org/10.3390/plants9121779>
- ANA (2021) **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada (2a)**. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Disponível em: <<https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/a874e62f27544c6a986da1702a911c6b>>. Acesso em 18 de novembro de 2023.
- ANTUNES, F. A. F. et al. Biofuel production from sugarcane in Brazil. In: **Sugarcane biofuels**. Springer, Cham, 2019. p. 99-121. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18597-8_5
- APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signaling transduction. **Annual review of plant biology**, v. 55, p. 373, 2004. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701>

- ASGARI, F. et al. Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 127, p. 152-160, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.021>
- BASNAYAKE, J. et al. Sugarcane for water-limited environments. Genetic variation in cane yield and sugar content in response to water stress. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 16, p. 6023-6033, 2012. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers251>
- BASNAYAKE, J. et al. Sugarcane for water-limited environments. Variation in stomatal conductance and its genetic correlation with crop productivity. **Journal of experimental botany**, v. 66, p. 3945-3958, 2015. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv194>
- BASTOS, A. V. S. et al. Productivity and dry matter accumulation of sugarcane crop under irrigation and nitrogen application at Rio Verde GO, Brazil. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, p. 2374, 2015. <https://doi.org/10.4236/ajps.2015.614240>
- BESHARAT, S.; BARÃO, L.; CRUZ, C. New strategies to overcome water limitation in cultivated maize: Results from sub-surface irrigation and silicon fertilization. **Journal of Environmental Management**, v. 263, p. 110398, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110398>
- BEZERRA, B. K. L. et al. Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta physiologiae plantarum**, v. 41, p. 1-12, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>
- BIRCHALL, J. D. The essentiality of silicon in biology. **Chemical Society Reviews**, v. 24, n. 5, p. 351-357, 1995. <https://doi.org/10.1039/CS9952400351>
- BÓCOLI, F. A. et al. Study of an abnormal occurrence of Oxisols in strongly undulated relief in the south of Minas Gerais, Brazil, with support of pXRF and geomorphology. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 45, p. e018121, 2021. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145018121>
- BUCHANAN, B. B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. L. (Ed.). **Biochemistry and molecular biology of plants**. John Wiley & sons, 2015.
- CAMARGO, M. S. et al. Silicon Fertilization in Sugarcane Drought-Contrasting Cultivars Subjected to Water Deficit at the Ripening Phase. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 3, p. 3209-3218, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01303-6>
- CAMARGO, M. S.; KEEPING, M. G. Silicon in sugarcane: availability in soil, fertilization, and uptake. **Silicon**, v. 13, p. 3691-3701, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00935-y>
- CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; WYLER, P. Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. **Field Crops Research**, v. 167, p. 64-75, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.07.009>
- CAO, B et al. Silicon-mediated changes in radial hydraulic conductivity and cell wall stability are involved in silicon-induced drought resistance in tomato. **Protoplasma**, v. 254, p. 2295-2304, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00709-017-1115-y>
- CARDOZO, N. P.; BORDONAL, R. DE O.; SCALA JR. N. L. Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. **Journal of Cleaner Production**, v. 204, p. 861-871, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.004>

CARPIO, L. G. T.; DE SOUZA, F. S. Optimal allocation of sugarcane bagasse for producing bioelectricity and second generation ethanol in Brazil: scenarios of cost reductions. **Renewable energy**, v. 111, p. 771-780, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.015>

CAUBET, M. et al. Agriculture increases the bioavailability of silicon, a beneficial element for crop, in temperate soils. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 19999, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77059-1>

CHAI, Q. et al. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 36, p. 1-21, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0338-6>

CHAKMA, R. et al. Growth, fruit yield, quality, and water productivity of grape tomato as affected by seed priming and soil application of silicon under drought stress. **Agricultural Water Management**, v. 256, p. 107055, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107055>

CHAVARRIA, G.; SANTOS, H. Plant water relations: absorption, transport and control mechanisms. **Advances in selected plant physiology aspects. Rijeka: Intech**, v. 1, n. 8, p. 105-132, 2012. <https://doi.org/10.5772/33478>

CHERUBIN, M. R. et al. Land use and management effects on sustainable sugarcane-derived bioenergy. **Land**, v. 10, p. 72, 2021. <https://doi.org/10.3390/land10010072>

CONAB (2023) - **Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar - Safra 2022/2023: Primeiro Levantamento - Novembro 2023**. Disponível online: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>. Acessado em 05 março de 2024.

COSKUN, D. et al. The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 1072, 2016. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01072>

COSTA, C. T. S.; SAAD, J. C. C.; SILVA JUNIOR, H. M. D. Growth and productivity of sugarcane varieties under various irrigation levels. **Revista Caatinga**, v. 29, p. 945-955, 2016. <https://doi.org/10.1590/1983-21252016v29n420rc>

COSTA, M. G. et al. 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, p. 949909, 2022. <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. 1, p. 51, 2023. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04077-2>

COSTA, M. G. et al. The effect of abiotic stresses on plant C: N: P homeostasis and their mitigation by silicon. **The Crop Journal**, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.11.012>

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Methods and extractants to evaluate silicon availability for sugarcane. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 916, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19240-1>

CURSI, D. E. et al. History and current status of sugarcane breeding, germplasm development and molecular genetics in Brazil. **Sugar Tech**, v. 24, p.112-133, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-00951-1>

DA SILVA, F. L. et al. Amorphous silica-based fertilizer reduces cd uptake and translocation and human health risk in polluted soil grown with cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). **Journal of Soil**

Science and Plant Nutrition, v. 23, n. 3, p. 3174-3185, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01333-0>

DALRI, A. B. et al. Adaptation and responsiveness of sugarcane cultivars under irrigated and rainfed production systems. **Engenharia Agrícola**, v. 41, p. 496-503, 2021. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n5p496-503/2021>

DARMAWAN et al. Effect of long-term intensive rice cultivation on the available silica content of sawah soils: Java Island, Indonesia. **Soil Science & Plant Nutrition**, v. 52, n. 6, p. 745-753, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2006.00089.x>

DE CAMARGO, M. S. et al. 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. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>

DE CAMARGO, M. S. et al. Silicon fertilization reduces the deleterious effects of water deficit in sugarcane. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 17, p. 99-111, 2017. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000008>

DE OLIVEIRA FILHO, A. S. B. et al. Water deficit modifies C: N: P stoichiometry affecting sugarcane and energy cane yield and its relationships with silicon supply. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, p. 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00441-0>

DE WRACHIEN, D.; SCHULTZ, B.; GOLI, M. B. Impacts of population growth and climate change on food production and irrigation and drainage needs: A world-wide view. **Irrigation and Drainage**, v. 70, n. 5, p. 981-995, 2021. <https://doi.org/10.1002/ird.2597>

DENG, X. et al. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China. **Agricultural water management**, v. 80, p. 23-40, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.021>

DESHMUKH, R. K.; MA, J. F.; BÉLANGER, R. R. Role of silicon in plants. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 1858, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01858>

DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap analysis in Brazil—A multi-model approach for determining magnitudes and causes. **Science of the Total Environment**, v. 637, p. 1127-1136, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.017>

DIETRICH, D. et al. Root hydrotropism is controlled via a cortex-specific growth mechanism. **Nature plants**, v. 3, n. 6, p. 1-8, 2017. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.57>

DOS SANTOS, O. A. Q. et al. Fire lead to disturbance on organic carbon under sugarcane cultivation but is recovered by amendment with vinasse. **Science of the Total Environment**, v. 739, p. 140063, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140063>

EPSTEIN, E. Silicon: its manifold roles in plants. **Annals of applied Biology**, v. 155, n. 2, p. 155-160, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x>

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 91, n. 1, p. 11-17, 1994. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>

FAO (2021) – Food and Agriculture Organization of the United Nations. The agricultural production indices. Food and Agricultural Organisation of the United Nations. Disponível em: <http://faostat.fao.org/%0A>. Acessado em 10 março de 2024.

- FAOSTAT (2020) – FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) Statistics. Crops and livestock products. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acessado em 10 março de 2024.
- FAROOQ, M. et al. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Sustainable agriculture**, p. 153-188, 2009. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>
- FERREIRA, T. H. S. et al. Sugarcane water stress tolerance mechanisms and its implications on developing biotechnology solutions. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 268808, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01077>
- FREW, A. et al. The role of silicon in plant biology: a paradigm shift in research approach. **Annals of Botany**, v. 121, p. 1265-1273, 2018. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy009>
- GASCHO, G. J. Silicon sources for agriculture. In: **Studies in plant science**. Elsevier, 2001. p. 197-207. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80016-1](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80016-1)
- GONÇALVES, I. Z. et al. Water relations and productivity of sugarcane irrigated with domestic wastewater by subsurface drip. **Agricultural Water Management**, v. 185, p. 105-115, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.01.014>
- GRAÇA, J. P. DA et al. Physiological parameters in sugarcane cultivars submitted to water deficit. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 22, p. 189-197, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202010000300006>
- GRIFFITHS, C. A.; PAUL, M. J. Targeting carbon for crop yield and drought resilience. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 97, p. 4663-4671, 2017. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8501>
- GUPTA, V. et al. The water-deficit stress-and red-rot-related genes in sugarcane. **Functional & integrative genomics**, v. 10, p. 207-214, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10142-009-0144-9>
- HAYNES, R. J. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 177, p. 831-844, 2014. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400202>
- HAYNES, R. J. Significance and role of Si in crop production. **Advances in Agronomy**, v. 146, p. 83-166, 2017. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.06.001>
- HE, C.; MA, J.; WANG, L. A hemicellulose-bound form of silicon with potential to improve the mechanical properties and regeneration of the cell wall of rice. **New Phytologist**, v. 206, n. 3, p. 1051-1062, 2015. <https://doi.org/10.1111/nph.13282>
- HITCHCOCK, A. S. Type species of the first 100 genera of Linnaeus' Species plantarum. **American Journal of Botany**, v. 10, n. 9, p. 510-514, 1923. <https://doi.org/10.2307/2446390>
- ILER, R. K. **The chemistry of silica**. New York: Wiley, 1979. 621 p.
- IMTIAZ, M. et al. Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: a review. **Journal of environmental management**, v. 183, p. 521-529, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.009>
- INMAN-BAMBER, N. G.; LAKSHMANAN, P.; PARK, S. Sugarcane for water-limited environments: Theoretical assessment of suitable traits. **Field Crops Research**, v. 134, p. 95-104, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.05.004>
- INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field crops research**, v. 92, p. 185-202, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.023>

- IPNI. 2015. **Silicon. Nutri-facts**, No. 14. [http://www.ipni.net/publication/nutrifacts_na.nsf/0/A7B4AB4D35C153BF85257ECE006E0E34/\\$FILE/NutriFacts-NA-14.pdf](http://www.ipni.net/publication/nutrifacts_na.nsf/0/A7B4AB4D35C153BF85257ECE006E0E34/$FILE/NutriFacts-NA-14.pdf). Accessed 06 March 2024
- IRFAN, M. et al. Silicon nutrition in plants under water-deficit conditions: overview and prospects. **Water**, v. 15, n. 4, p. 739, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15040739>
- KATZ, O. et al. Silicon in the soil–plant continuum: Intricate feedback mechanisms within ecosystems. **Plants**, v. 10, p. 652, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10040652>
- KAYA, C.; TUNA, L.; HIGGS, D. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. **Journal of plant nutrition**, v. 29, n. 8, p. 1469-1480, 2006. <https://doi.org/10.1080/01904160600837238>
- KEEPING, M. G. Uptake of silicon by sugarcane from applied sources may not reflect plant-available soil silicon and total silicon content of sources. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 245515, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00760>
- KIM, Y. et al. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 510, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00510>
- KNIGHT, C. T.G.; KINRADE, S. D. A primer on the aqueous chemistry of silicon. In: **Studies in plant science**. Elsevier, 2001. p. 57-84. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80008-2](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80008-2)
- KORNDÖRFER, G. H. et al. Calibration of soil and plant silicon analysis for rice production. **Journal of Plant Nutrition**, v. 24, n. 7, p. 1071-1084, 2001. <https://doi.org/10.1081/PLN-100103804>
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: UFU, 2004.
- KOVDA, V. A. Biogeochemistry of soil cover. **Nauka Publication**, Moscow, p. 159-179, 1985.
- LEAL, D. P. V. et al. Water productivity for sugar and biomass of sugarcane varieties. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 618-622, 2017. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n9p618-622>
- LIANG, Y. et al. Silicon biogeochemistry and bioavailability in soil. **Silicon in agriculture: from theory to practice**, p. 45-68, 2015. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2_3
- MA, J. F. et al. Role of root hairs and lateral roots in silicon uptake by rice. **Plant physiology**, v. 127, n. 4, p. 1773-1780, 2001. <https://doi.org/10.1104/pp.010271>
- MACHADO, R. S. et al. Biometric and physiological responses to water deficit in sugarcane at different phenological stages. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 1575-1582, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001200003>
- MARIN, F. R. et al. Sugarcane evapotranspiration and irrigation requirements in tropical climates. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 140, p. 1349-1357, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03161-z>
- MARTIN, E. C. et al. Sugar, oil, and fiber. **Irrigation of agricultural crops**, v. 30, p. 277-335, 2007. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr30.2ed.c9>

- MATICHENKOV, V. V.; BOCHARNIKOVA, E. A. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. In: **Studies in plant science**. Elsevier, 2001. p. 209-219. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80017-3](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80017-3)
- MCCRAY, J. M.; JI, S. Comparison of Silicon Sources for Sugarcane on Mineral and Organic Soils in Florida. **Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists**, v. 33, p1-15, 2013.
- MEIRELLES, G. C. et al. Evaluation of Silicon Bioavailability in Soil with Different Chemical Extractants. **Silicon**, v. 15, n. 2, p. 925-935, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-01768-7>
- MEYER, J. H.; KEEPING, M. G. Past, present and future research of the role of silicon for sugarcane in southern Africa. In: **Studies in plant science**. Elsevier, 2001. p. 257-275. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80020-3](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80020-3)
- MILLS-IBIBOFORI, T. et al. Use of diatomaceous earth as a silica supplement on potted ornamentals. **Horticulturae**, v. 5, n. 1, p. 21, 2019. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5010021>
- MISRA, V. et al. Silicon as a beneficial nutrient for productivity augmentation and abiotic/biotic stress tolerance in sugarcane. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, p. 102944, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102944>
- MOLIJN, R. A. et al. Sugarcane productivity mapping through C-band and L-band SAR and optical satellite imagery. **Remote Sensing**, v. 11, p. 1109, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11091109>
- MORAES, S. P. O. et al. Beneficial effects of silicon in plants under abiotic stress conditions: A new approach. **Revista Ciência Agronômica**, v. 53, p. 1-11, 2022. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20220052>
- MUKARRAM, M. et al. Silicon nanoparticles in higher plants: Uptake, action, stress tolerance, and crosstalk with phytohormones, antioxidants, and other signalling molecules. **Environmental Pollution**, p. 119855, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119855>
- NASCIMENTO, C. W. A. et al. Efficiency and recovery index of silicon of a diatomaceous Earth-based fertilizer in two soil types grown with sugarcane and maize. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 16, p. 2347-2358, 2021. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1918157>
- NAWAZ, M. A. et al. Phytolith formation in plants: from soil to cell. **Plants**, v. 8, n. 8, p. 249, 2019. <https://doi.org/10.3390/plants8080249>
- NEETHIRAJAN, S.; GORDON, R.; WANG, L. Potential of silica bodies (phytoliths) for nanotechnology. **Trends in Biotechnology**, v. 27, n. 8, p. 461-467, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.05.002>
- NEVES, L. V. DE M. W. et al. Associations between attributes of Nitisols and the climate of the Southern coast of Pernambuco. **Revista Caatinga**, v. 31, p. 255-263, 2018. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n130rc>
- OCDE/FAO. **Perspectivas Agrícolas** OCDE-FAO 2019 - 2028; OCDE: Roma, Itália, 2019.
- OLIVA, K. M. E. et al. Amorphous Silica-Based Fertilizer Increases Stalks and Sugar Yield and Resistance to Stalk Borer in Sugarcane Grown Under Field Conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 3, p. 2518–2529, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00543-8>
- OLIVA, K. M. E. et al. Biomass and concentration of nutrients and silicon in sugarcane grown on soil fertilized with diatomite. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 4, p. 1-7, 2020. <https://doi.org/10.5039/agraria.v15i4a8755>

- OLIVEIRA FILHO, A. S. B. et al. 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. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107006>
- OLIVEIRA, E. C. A. et al. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana de açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 46, p. 617-625, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000600007>
- OLIVERA-VICIEDO, D. et al. Silicon uptake and utilization on *Panicum maximum* grass modifies C:N:P stoichiometry under warming and soil water deficit. **Soil and Tillage Research**, v. 235, p. 105884, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105884>
- PATI, S. et al. Effect of silicon fertilization on growth, yield, and nutrient uptake of rice. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 47, n. 3, p. 284-290, 2016. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1122797>
- PEI, Z. F. et al. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 29, p. 106-115, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9120-9>
- PEREIRA, L. S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural water management**, v. 108, p. 39-51, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.022>
- PINHEIRO, C.; CHAVES, M. M. Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data?. **Journal of experimental botany**, v. 62, p. 869-882, 2011. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq340>
- PIPERNO, D. R. **Phytoliths: a comprehensive guide for archaeologists and paleoecologists**. Rowman Altamira, 2006.
- PIRES, R. C. M. et al. Effects of subsurface drip irrigation and different planting arrangements on the yields and technological quality of sugarcane. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 140, p. A5014001, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000710](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000710)
- PRYCHID, C. J.; RUDALL, P. J.; GREGORY, M. Systematics and biology of silica bodies in monocotyledons. **The botanical review**, v. 69, n. 4, p. 377-440, 2003. [https://doi.org/10.1663/0006-8101\(2004\)069\[0377:SABOSB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0006-8101(2004)069[0377:SABOSB]2.0.CO;2)
- RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 185, p. 83-89, 2000. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037x.2000.00404.x>
- RASTOGI, A. et al. Does silicon really matter for the photosynthetic machinery in plants...?. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 169, p. 40-48, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.004>
- RAVEN, J. A. Cycling silicon: the role of accumulation in plants. **New Phytologist**, p. 419-421, 2003. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00778.x>
- RAVEN, J.A. The transport and function of silicon in plants. **Biological reviews**, v. 58, n. 2, p. 179-207, 1983. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1983.tb00385.x>
- RAZI, K.; MUNEEER, S. Drought stress-induced physiological mechanisms, signaling pathways and molecular response of chloroplasts in common vegetable crops. **Critical reviews in biotechnology**, v. 41, p. 669-691, 2021. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1874280>

- RESENDE, R. S. et al. Soil Penetration Resistance and Sugarcane Rooting Under Subsuperficial Drip Irrigation Levels. **Sugar Tech**, p. 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01186-4>
- RICHMOND, K. E.; SUSSMAN, M. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. **Current opinion in plant biology**, v. 6, p. 268-272, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00041-4)
- ROCHA, J. R. et al. Si fertigation attenuates water stress in forages by modifying carbon stoichiometry, favouring physiological aspects. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n. 4, p. 631-643, 2021. <https://doi.org/10.1111/jac.12479>
- ROSSETTO, R. et al. Sustainability in Sugarcane Supply Chain in Brazil: Issues and Way Forward. **Sugar Tech**, p. 1-26, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01170-y>
- SANDHYA, K.; PRAKASH, N. B. Bioavailability of silicon from different sources and its effect on the yield of rice in acidic, neutral, and alkaline soils of Karnataka, South India. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 50, n. 3, p. 295-306, 2019. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1563096>
- SAUER, D. et al. Review of methodologies for extracting plant-available and amorphous Si from soils and aquatic sediments. **Biogeochemistry**, v. 80, p. 89-108, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10533-005-5879-3>
- SAUER, D. et al. Review of methodologies for extracting plant-available and amorphous Si from soils and aquatic sediments. **Biogeochemistry**, v. 80, p. 89-108, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10533-005-5879-3>
- SCARPARE, F. V. et al. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. **Journal of cleaner production**, v. 112, p. 4576-4584, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.107>
- SCHALLER, J. et al. Silicon cycling in soils revisited. **Plants**, v. 10, n. 2, p. 295, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10020295>
- SCHIEBER, M.; CHANDEL, N. S. ROS function in redox signaling and oxidative stress. **Current biology**, v. 24, p. R453-R462, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.03.034>
- SCHALLER, J.; PUPPE, D.. Silicon biogeochemistry in terrestrial ecosystems. In: **Benefits of Silicon in the Nutrition of Plants**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 1-16. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26673-7_1
- SHARMA, B. et al. Silicon and plant nutrition—dynamics, mechanisms of transport and role of silicon solubilizer microbiomes in sustainable agriculture: A review. **Pedosphere**, v. 33, n. 4, p. 534-555, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.11.004>
- SINGH, I.; VERMA, R. R.; SRIVASTAVA, T. K. Growth, yield, irrigation water use efficiency, juice quality and economics of sugarcane in pusa hydrogel application under different irrigation scheduling. **Sugar Tech**, v. 20, p. 29-35, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0515-9>
- SOM-ARD, J. et al. Remote sensing applications in sugarcane cultivation: A review. **Remote sensing**, v. 13, p. 4040, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13204040>
- SOMMER, M. et al. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes—a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 169, n. 3, p. 310-329, 2006. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521981>
- SOMMER, M. et al. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes—a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 169, p. 310-329, 2006. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521981>

SONOBE, K. et al. Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress. **Journal of Plant Nutrition**, v. 34, n. 1, p. 71-82, 2010. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.531360>

SOUSA, R. T. X. D.; KORNDÖRFER, G. H.; WANGEN, D. R. B. Aproveitamento de silício proveniente de escória siderúrgica por cultivares de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 69, p. 669-676, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000300019>

SOUZA JUNIOR, I. G. de et al. Contribuição dos constituintes da fração argila de solos subtropicais à área superficial específica e à capacidade de troca catiônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1355-1365, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600014>

SOUZA JÚNIOR, J. P. et al. Analyzing the Role of Silicon in Leaf C: N: P Stoichiometry and Its Effects on Nutritional Efficiency and Dry Weight Production in Two Sugarcane Cultivars. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 2687-2694, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00836-6>

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology**, 5th ed. Sinauer Associates, Inc., Massachusetts, 2013, 782.
TAYADE, A. S. et al. Water-efficient genotypes along with conservation measures significantly reduce the green and blue water footprints in sugarcane (*Saccharum* spp.). **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 13229, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40223-4>

TEIXEIRA, G. C. M. et al. Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 17487, 2022a. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21680-9>

TEIXEIRA, G. C. M. et al. Beneficial effect of silicon applied through fertigation attenuates damage caused by water deficit in sugarcane. **Journal of Plant Growth Regulation**, p. 1-16, 2021d. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10510-3>

TEIXEIRA, G. C. M. et al. Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the effects of water deficit after transplanting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 849-859, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00170-4>

TEIXEIRA, G. C. M. Silicon as a sustainable option to increase biomass with less water by inducing carbon: nitrogen: phosphorus stoichiometric homeostasis in sugarcane and energy cane. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 826512, 2022b. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.826512>

TEIXEIRA, G. C. M., Mello Prado, R., Rocha, A. M. S. Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water deficit damage in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 208, n. 6, p. 805-814, 2021c. <https://doi.org/10.1111/jac.12511>

TRIPATHI, D. K. et al. Silicon nanoparticles more effectively alleviated UV-B stress than silicon in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 110, p. 70-81, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.06.026>

TUBANA, B. S. Dynamics of Silicon in Soil and Plant to Establish Silicate Fertilization. In: **Benefits of Silicon in the Nutrition of Plants**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 57-73. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26673-7_4

TUBANA, B. S.; BABU, T.; DATNOFF, L. E. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives. **Soil science**, v. 181, p. 393-411, 2016. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000179>

TUBAÑA, B. S.; HECKMAN, J. R.. Silicon in soils and plants. Silicon and plant diseases, p. 7-51, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22930-0_2

- VERMA, K. K. et al. Foliar application of silicon boosts growth, photosynthetic leaf gas exchange, antioxidative response and resistance to limited water irrigation in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 582-592, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.032>
- VERMA, K. K. et al. Mitigating climate change for sugarcane improvement: role of silicon in alleviating abiotic stresses. **Sugar Tech**, v. 22, p. 741-749, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00831-0>
- VICIEDO, D. O. et al. Short-term warming and water stress affect *Panicum maximum* Jacq. stoichiometric homeostasis and biomass production. **Science of The Total Environment**, v. 681, p. 267-274, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.108>
- VOLKOVA, V. V. Silicate content in soil solutions and natural waters of the Russian plain. In: KOVDA, V. A. (E d). **Pedological and biogeocenotic research of the Russian lowland centre**. Nauka Publication, Moscow. 1980
- WALTER, A. et al. Brazilian sugarcane ethanol: developments so far and challenges for the future. **Advances in Bioenergy: The Sustainability Challenge**, p. 373-394, 2016. <https://doi.org/10.1002/9781118957844.ch24>
- WANG, D. et al. The mechanisms of silicon on maintaining water balance under water deficit stress. **Physiologia Plantarum**, v. 173, n. 3, p. 1253-1262, 2021f. <https://doi.org/10.1111/ppl.13520>
- WANG, M. et al. Functions of silicon in plant drought stress responses. **Horticulture Research**, v. 8, 2021e. <https://doi.org/10.1038/s41438-021-00681-1>
- WANG, Z. et al. Drought-induced proline is mainly synthesized in leaves and transported to roots in watermelon under water deficit. **Horticultural Plant Journal**, v. 8, p. 1-12, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2022.06.009>
- WILLIAMS, L. A.; CRERAR, D. A. Silica diagenesis; II, General mechanisms. **Journal of Sedimentary Research**, v. 55, n. 3, p. 312-321, 1985. <https://doi.org/10.1306/212F86B1-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- WU, W. et al. Effects of Coupling Water and Fertilizer on Agronomic Traits, Sugar Content and Yield of Sugarcane in Guangxi, China. **Agronomy**, v. 12, p. 321, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020321>
- XU, R. et al. Functions of silicon and phytolith in higher plants. **Plant Signaling & Behavior**, v. 18, n. 1, p. 2198848, 2023. <https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2198848>
- YANG, D. et al. Effect of drip irrigation on wheat evapotranspiration, soil evaporation and transpiration in Northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 232, p. 106001, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106001>
- YOSHIDA S. Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant. **Bulletin of the National Institute of Agricultural Sciences Series B**. v. 15, p. 1-58, 1965.
- ZELLNER, W. et al. Silicon's role in plant stress reduction and why this element is not used routinely for managing plant health. **Plant disease**, v. 105, n. 8, p. 2033-2049, 2021. <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-20-1797-FE>

ZHANG, S. Y. et al. The responses of photosynthetic rate and stomatal conductance of *Fraxinus rhynchophylla* to differences in CO₂ concentration and soil moisture. **Photosynthetica**, v. 51, p. 359-369, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0033-2>

CAPÍTULO II

**APLICAÇÃO DE SILÍCIO NA FORMA DE SÍLICA AMORFA NO CRESCIMENTO,
RELAÇÕES HÍDRICAS E PERFORMANCE FOTOSSINTÉTICA DA CANA-DE-
AÇÚCAR SOB ESTRESSE HÍDRICO**

CAPÍTULO II: Aplicação de silício na forma de sílica amorfa no crescimento, relações hídricas e performance fotossintética da cana-de-açúcar sob estresse hídrico

RESUMO: O silício (Si) tem demonstrado eficácia na mitigação dos danos causados pelo déficit hídrico na cultura da cana-de-açúcar; no entanto, os mecanismos envolvidos ainda requerem maior elucidação. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos de doses de Si, aplicadas na forma de sílica amorfa via solo, sob diferentes níveis de irrigação, nas respostas de crescimento, relações hídricas e desempenho fotossintético da cana-de-açúcar durante fases críticas de desenvolvimento: perfilhamento e alongamento dos colmos. O experimento foi conduzido em ambiente protegido na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) (8°01'00.5"S 34°56'40.6"W a 4 m). Os tratamentos consistiram em dois níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura - ETc), e quatro doses de Si: 0 (controle), 78, 117 e 156 kg ha⁻¹ de Si utilizando as doses respectivas de 0, 300, 450 e 600 kg ha⁻¹ de sílica amorfa (Agrisilica, Agripower, NSW, Austrália) (26% Si). A condição de 20% da evapotranspiração da cultura (ETc), limitou o crescimento da cana-de-açúcar. A aplicação de Si na dose de 82,1 kg ha⁻¹ teve um efeito benéfico, promovendo um aumento na altura dos colmos, que alcançaram um valor máximo de 1,71 m. A nutrição com Si resultou em um incremento na produção de massa seca da parte aérea, com uma produção máxima de 600,09 g por planta ao utilizar a dose de 80,7 kg ha⁻¹ de Si. A fertilização com Si melhorou as respostas fisiológicas das plantas, aumentando o potencial hídrico e o conteúdo relativo de água nas folhas, resultando em hidratação dos tecidos vegetais. Em condições de déficit hídrico severo, a aplicação de 89,5 kg ha⁻¹ de Si aumenta a produção de massa seca dos colmos. A aplicação de Si no solo, na forma de sílica amorfa, melhora a tolerância da cana-de-açúcar ao estresse hídrico severo, como evidenciado pelo aumento do conteúdo relativo de água e do potencial hídrico foliar, o que, por sua vez, impacta positivamente as trocas gasosas nas folhas. Esses achados indicam o potencial do uso de fertilizantes à base de sílica amorfa para otimizar a eficiência da irrigação na cultura da cana-de-açúcar.

Palavras – chave: irrigação deficitária, relações hídricas foliares, *Saccharum officinarum* L., sílica amorfa.

Application of silicon in the form of amorphous silica on growth, water relations, and photosynthetic performance of sugarcane under water stress

ABSTRACT: Silicon (Si) has demonstrated effectiveness in mitigating damage caused by water deficit in sugarcane crops; however, the mechanisms involved still require further elucidation. The objective of this study was to evaluate the effects of Si doses, applied in the form of amorphous silica via soil, under different irrigation levels on the growth responses, water relations, and photosynthetic performance of sugarcane during critical development phases: tillering and stem elongation. The experiment was conducted in a protected environment at the Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE) (8°01'00.5"S 34°56'40.6"W at 4 m). The treatments consisted of two irrigation levels (50% and 20% of crop evapotranspiration - ETc) and four Si doses: 0 (control), 78, 117, and 156 kg ha⁻¹ of Si using the respective doses of 0, 300, 450, and 600 kg ha⁻¹ of amorphous silica (Agrisilica, Agripower, NSW, Australia) (26% Si). The 20% ETc condition limited sugarcane growth. The application of Si at a dose of 82.1 kg ha⁻¹ had a beneficial effect, promoting an increase in stem height, reaching a maximum value of 1.71 m. Si nutrition resulted in an increase in the production of shoot dry mass, with a maximum production of 600.09 g per plant when using the dose of 80.7 kg ha⁻¹ of Si. Si fertilization improved the physiological responses of the plants, increasing water potential and relative water content in the leaves, leading to better tissue hydration. Under severe water deficit conditions, the application of 89.5 kg ha⁻¹ of Si increases the dry mass production of the stems. This practice is an effective strategy to improve sugarcane productivity in regions prone to water stress. The application of Si to the soil, in the form of amorphous silica, enhances the tolerance of sugarcane to severe water stress, as evidenced by increased relative water content and leaf water potential, which in turn positively impacts gas exchange in the leaves. These findings indicate the potential of using amorphous silica-based fertilizers to optimize irrigation efficiency in sugarcane cultivation.

Keywords: deficient irrigation, leaf water relations, *Saccharum officinarum* L., amorphous silica.

1. INTRODUÇÃO

O grande desafio atual da cana-de-açúcar para alcançar maiores produtividades é superar os efeitos deletérios do déficit hídrico (DE CAMARGO et al., 2019), que têm causado perdas significativas de rendimento da cultura (TEIXEIRA et al., 2022). Esse desafio é importante, porque a área de cultivo da cana-de-açúcar se expandiu e ocupa mais de 100 países (FAO, 2021). Isto se deve ao fato de a cana-de-açúcar ser uma das culturas econômicas mais importantes em diversos países tropicais, fornecendo 70% da produção total de açúcar em todo o mundo e por ser uma matéria-prima crucial para a produção de biocombustíveis (BEZERRA et al., 2019).

O cultivo de cana-de-açúcar irrigada tem se expandido, especialmente nos principais países produtores, como Brasil (ANA, 2021), China (HE et al., 2021) e Índia (DINGRE; GORANTIWAR; KADAM, 2021). Prevê-se que, até 2050, a procura de água para irrigação aumente 11% (COSTA et al., 2023; GONZALEZ-PORRAS et al., 2024). Principalmente, por causa do aumento das secas em muitas regiões, devido à diminuição da precipitação e ao aumento da evaporação causados pelas alterações climáticas globais (NAUMANN et al., 2018; MARCHIN et al., 2020), o que resulta num desafio maior para muitas regiões que vivem sob restrições hídricas (DE WRACHIEN; SCHULTZ; GOLI, 2021).

Na cultura da cana-de-açúcar as fases de crescimento mais críticas afetadas pelo déficit hídrico são o perfilhamento e o alongamento dos colmos (DE CAMARGO et al., 2019; QIN et al., 2023). Várias respostas fisiológicas ao estresse hídrico são bem documentadas na espécie, incluindo a redução do potencial hídrico, do teor relativo de água, da atividade fotossintética e o aumento do extravasamento de eletrólitos (MACHADO et al., 2009; MEDEIROS et al., 2013; FERREIRA et al., 2017; BEZERRA et al., 2019).

A prática de aplicar água de irrigação abaixo da demanda de evapotranspiração total da planta (ET) é conhecida como irrigação deficitária (CHAI et al., 2016); esta abordagem é empregada em cenários de escassez hídrica nas culturas (IBRAHIM et al., 2022). Desta forma, as plantas submetidas a sistemas de irrigação deficitária recebem uma quantidade de água de irrigação inferior à necessária durante as fases de crescimento e/ou ao longo do ciclo de cultivo (BADAL et al., 2013). Isso resulta na exposição das plantas a níveis variados de estresse hídrico nesses sistemas de irrigação (WAKCHAURE et al., 2018; PARKASH e SINGH, 2020).

Diante desse cenário, é crucial gerir de forma eficiente a irrigação e o consumo de água, mantendo, preferencialmente o rendimento das culturas através de estratégias de manejo (LEGHARI et al., 2018; YANG; LEGHARI; GUAN, 2020), que venham à melhorar a eficiência

do uso da água e incentivar a utilização responsável deste recurso vital para a agricultura (GONZALEZ-PORRAS et al., 2024), principalmente em ambientes que sofrem com restrição hídrica.

Uma estratégia eficaz para mitigar os danos causados pela restrição hídrica em culturas agrícolas é a aplicação de silício (Si) (TEIXEIRA et al., 2022). Quando depositado nas folhas, o Si desempenha um papel crucial na epiderme das células vegetais, formando uma camada dupla de sílica-cutícula que reduz significativamente a perda de água por transpiração cuticular (MVONDO-SHE e MARAIS, 2019; CHERAGHI et al., 2024). Essa proteção preserva o conteúdo relativo de água nas folhas, permitindo a manutenção dos estômatos abertos, mesmo sob condições de estresse hídrico (VANDEGEER et al., 2021). A abertura dos estômatos facilita as trocas gasosas, reduz a produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (ROS) nas células e, conseqüentemente, mitiga o estresse oxidativo (CHERAGHI et al., 2024)

Embora o Si seja o segundo elemento mais abundante no solo, ficando atrás apenas do oxigênio, ele não está prontamente disponível para absorção pelas plantas devido à sua forma polimerizada no solo (DEBONA; RODRIGUES; DATNOFF, 2017). Na solução do solo, o Si disponível encontra-se na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4), em concentrações relativamente baixas ($\sim 1 \text{ mmol L}^{-1}$) (KATZ et al., 2021), que é absorvido pela epiderme da raiz em $\text{pH} < 9$ (TUBAÑA e HECKMAN, 2015). Uma vez absorvido, o ácido monossilícico é translocado pelo xilema até as folhas, impulsionado pelo gradiente transpiratório (MITANI-UENO e MA, 2021).

Nos últimos anos, as pesquisas com o fertilizante de sílica amorfa em cana-de-açúcar no Brasil têm ganhado grande atenção. Os resultados indicam que essa fonte de Si tem proporcionado aumentos na concentração de Si nas folhas e colmos com a aplicação de doses crescentes de Si, porém, a maioria dos estudos focou em solos de textura arenosa (OLIVA et al., 2020; OLIVA et al., 2021; NASCIMENTO et al., 2021), e até o momento, são inexistentes pesquisas com o uso da sílica amorfa em cana-planta sob déficit hídrico prolongado (60 – 150 dias), em solos de textura intermediária, como o franco-argilo-arenoso.

Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de doses de Si, aplicadas na forma de sílica amorfa via solo, sob diferentes níveis de irrigação, nas respostas de crescimento, relações hídricas e performance fotossintética da cana-de-açúcar durante fases críticas de desenvolvimento: perfilhamento e alongamento dos colmos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Condições de cultivo e material vegetal

O experimento foi conduzido com a cultura da cana-de-açúcar em ambiente protegido no Departamento de Agronomia, situado no campus sede da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), localizada em Recife, Pernambuco, Brasil ($8^{\circ}01'00.5''S$ $34^{\circ}56'40.6''W$ a 4 m) de maio a outubro de 2023. Os dados de temperatura e umidade relativa do ar máxima, mínima e média no interior da casa de vegetação foram registrados diariamente com o auxílio de um termo-higrômetro digital (HTC-2A, Foco Instrumentos de Medição) (Figura 1).

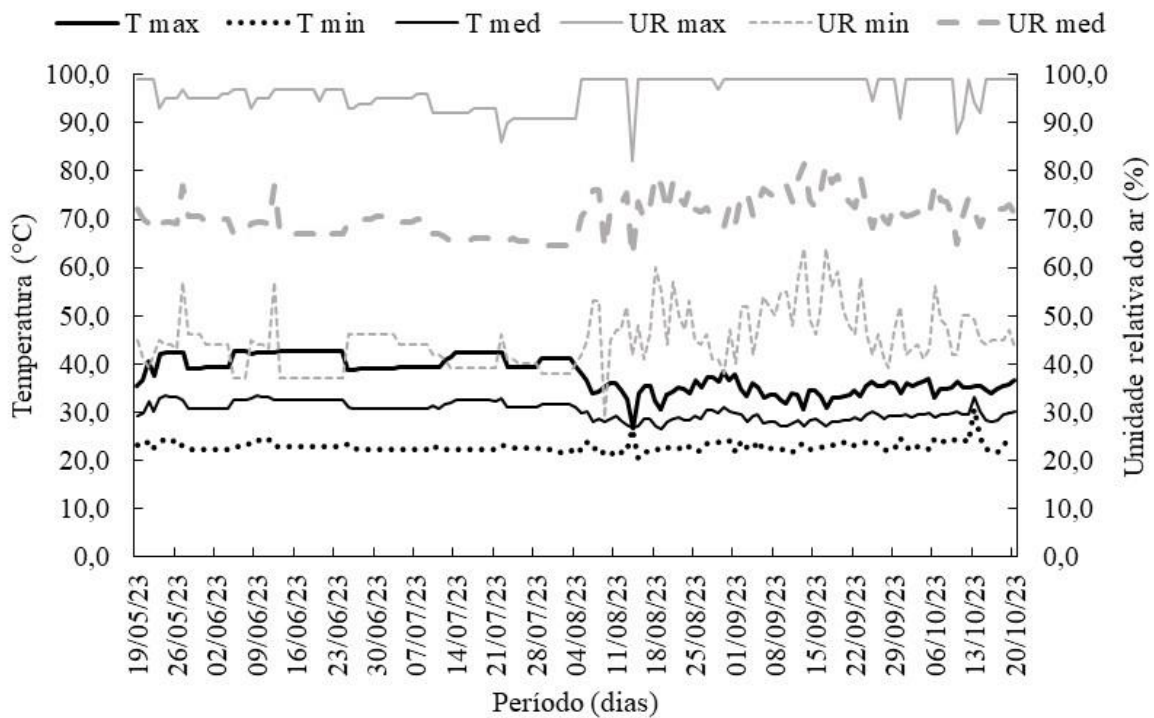


Figura 1. Temperatura máxima (T max), mínima (T min) e média (T med) e umidade relativa máxima (UR max), mínima (UR min) e média (UR med) do ar na casa de vegetação durante o período do experimento.

O solo utilizado para o experimento foi coletado da camada superficial de 0-20 cm em uma área experimental que foi anteriormente cultivada com cana-de-açúcar na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC), unidade integrante da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) localizada no município de Carpina, ($7^{\circ}51'07''S$ $35^{\circ}14'16''W$, a 180 m), na região da Zona da Mata do Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil.

O solo utilizado no estudo apresentou textura Franco - argilo - arenosa e classificação como Argissolo Amarelo Distrófico abrupto de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos (EMBRAPA, 2018). Para a caracterização físico - hidrica e química do solo (Tabela 1) foram analisadas dez amostras de solo após preparo da terra fina seca ao ar (TFSA). A análise granulométrica e argila dispersa em água (ADA) foram realizadas pelo método do densímetro, densidade do solo pelo método do torrão parafinado e de partículas pelo método do balão volumétrico (TEIXEIRA et al., 2017). A partir da curva de retenção de água no solo (CRAS), determinou-se a umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) de $0,29 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) de $0,11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, utilizando a mesa de tensão para equilibrar as amostras em potenciais baixos (1, 6 e 10 kPa); e câmara de pressão de Richard (KLUTE; ARNOLD, 1986) para potenciais médios e altos (33, 300 e 1.500 kpa). O ajuste da curva foi realizado aplicando Modelo de Van Genuchten (1980).

Nas análises químicas foram determinadas pH em água; cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+); Al^{3+} trocável; acidez potencial (H^+ +Al) e fósforo disponível. O pH foi determinado em água com relação 1:2,5 (solo:solução); Na^+ e K^+ trocável e P disponível foram extraídos por Mehlich⁻¹ e determinados por fotometria de emissão de chama e por colorimetria, respectivamente; $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ trocáveis foram extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e determinados por titulometria (TEIXEIRA et al., 2017). Os micronutrientes Cu, Mn, Zn e Fe foram extraídos por Mehlich⁻¹ e determinados por espectrometria de emissão ótica (ICP-OES). O teor de Si disponível foi determinado pelo método do cloreto de cálcio (CaCl_2) a $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ de acordo com o método de Korndörfer et al. (2004) (Tabela 1).

Tabela 1- Caracterização físico-química e hídrica do solo utilizado no experimento coletado na camada de 0-20 cm

Característica química	Valor	Característica físico – hídrica	Valor
pH (H_2O)	4,67	Areia (g kg^{-1})	704,95
$\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	6,30	Silte (g kg^{-1})	79,02
MO (g dm^{-3})	27,36	Argila (g kg^{-1})	216,03
P (mg dm^{-3})	6,90	Classe textural	Franco - argilo - arenosa
K^+ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,20	ADA (%)	14,18
Ca^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	3,10	GF	33,94
Mg^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,20	Ds (g cm^{-3})	1,70

Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,03	Dp (g cm ⁻³)	2,52
SB ^a (cmol _c dm ⁻³)	3,50	Porosidade (%)	33,84
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,45	θ _{CC} (cm ³ cm ⁻³)	0,29
CTC ^b efetiva (cmol _c dm ⁻³)	9,80	θ _{PMP} (cm ³ cm ⁻³)	0,11
V ^c (%)	35,71		
Si CaCl ₂ (mg/dm ⁻³)	18,72		
Cu (mg/dm ⁻³)	0,28		
Mn (mg/dm ⁻³)	3,31		
Zn (mg/dm ⁻³)	1,64		
Fe (mg/dm ⁻³)	81,08		

- 1 ^a Soma de bases (SB = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺)
- 2 ^b Capacidade de troca catiônica (CTC = SB + H + Al)
- 3 ^c Saturação por base (V = SBx100/T)
- 4 MO: Matéria Orgânica
- 5 ADA: Argila dispersa em água
- 6 GF: Grau de flocculação
- 7 Ds: Densidade do Solo
- 8 Dp: Densidade de partícula
- 9 θ_{CC}: Umidade na capacidade de campo
- 10 θ_{PMP}: Umidade no ponto de murcha permanente

Após a coleta do solo na área experimental da EECAC - UFRPE, o material foi seco ao ar, destorroado e peneirado em uma malha de 4 mm. Antes de encher os vasos, foi instalado um sistema de drenagem para otimizar as condições de aeração. Para isso, foram feitos dois orifícios de aproximadamente 1 cm de diâmetro na base de cada vaso (Figura 2a). Em seguida, foi colocada uma camada de brita com 19 mm de espessura (Figura 2b), sobre a qual foi posicionada uma manta geotêxtil Bidim RT-08 (Figura 2c). Essa configuração teve como principal objetivo reter as partículas de solo da camada superior, evitando a obstrução do sistema de drenagem e assegurando um fluxo adequado de água. Em seguida, 90 kg de solo foram pesados, homogeneizados com 5,75 g dm³ de calcário dolomítico e colocados em vasos plásticos de 80 L. O solo foi incubado nos vasos por 30 dias, mantendo-se na capacidade de campo (θ_{cc}) para permitir as reações químicas do calcário. O corretivo foi aplicado com base em uma curva de incubação prévia, ajustando o pH de 4,7 para uma faixa entre 6,0 e 6,5.

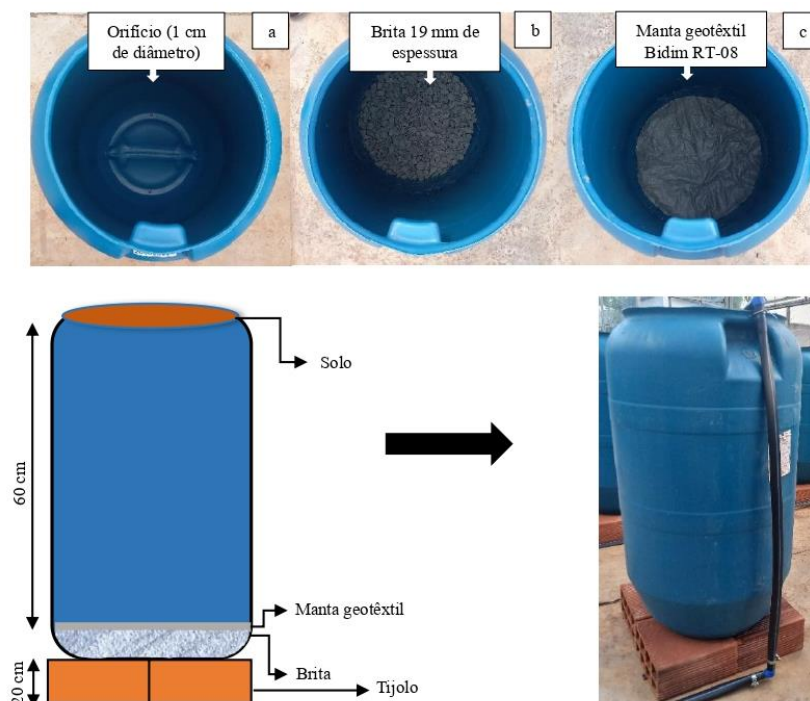


Figura 2. Esquema da unidade experimental

Aos vinte e sete dias após a calagem, foi realizada a adubação de plantio em cada vaso, a uma profundidade de 30 cm no solo. As doses aplicadas foram de $255,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de N, $340,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de P, $425,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de K e $127,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de S na forma de sulfato de amônio, superfosfato triplo, cloreto de potássio e sulfato de amônio, respectivamente. Simultaneamente à adubação com macronutrientes, foram realizadas as aplicações dos tratamentos com Si. A fonte de silicato utilizada no experimento foi o fertilizante de sílica amorfa, derivado de terra diatomácea (Agrisilica™ da Agripower Australia Limited). Este fertilizante contém 26% de Si disponível para plantas, além de 1,5% de cálcio (Ca), 1,0% de magnésio (Mg) e 1,3% de ferro (Fe). O produto é apresentado na forma de grânulos de 2,0 a 5,0 mm, possui um pH de 8,1, capacidade de troca catiônica (CTC) superior a $30,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e uma densidade de 900 kg m^{-3} (OLIVA et al., 2021).

A espécie utilizada neste estudo foi *Saccharum officinarum* L., especificamente a variedade RB041443. Desenvolvida pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e lançada pela Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA) em julho de 2021, essa variedade destaca-se por sua tolerância moderada ao déficit hídrico, mantendo uma produtividade satisfatória mesmo em condições de disponibilidade hídrica reduzida, quando comparada a outras variedades mais sensíveis. No entanto, como

observado em muitas outras variedades, a produtividade e o acúmulo de sacarose podem ser comprometidos em situações de estresse hídrico prolongado ou severo.

A RB041443 apresenta uma série de atributos favoráveis, incluindo elevado potencial produtivo, tanto em tonelada de colmos por hectare (TCH) quanto em tonelada de açúcar por hectare (TAH). Além disso, destaca-se pela resistência a nematoides (*Meloidogyne incógnita*), e às ferrugens marrom e alaranjada, bem como por sua excelente adaptação a diferentes condições de solo e clima. Ademais, essa variedade produz colmos com alto teor de sacarose, uma característica crucial para a produção eficiente de açúcar e etanol.

Para o plantio, foram coletados toletes (colmos fracionados) da variedade RB041443 em uma área pública cultivada com cana-de-açúcar pertencente à EECAC - UFRPE. Os toletes foram cultivados com gemas únicas, sendo três gemas cultivadas por vaso, 30 dias após a aplicação da calagem. Após a germinação, foi realizado o desbaste aos 20 dias após o plantio (DAP), deixando-se uma única planta por vaso.

A fertilização com micronutrientes foi realizada aos 56 dias após a calagem, via fertirrigação em dose única, com a aplicação das seguintes doses e fontes por vaso: 6,8 mg dm⁻³ de Mn (MnSO₄.H₂O); 1,7 mg dm⁻³ de B (H₃BO₃); 0,3 mg dm⁻³ de Mo ((NH₄)₆MO₇O₂₄.4H₂O); 1,7 mg dm⁻³ de Cu (CuSO₄) e 0,9 mg dm⁻³ de Zn (ZnSO₄.7H₂O). Não foi necessária a adubação com Fe devido à presença de quantidades adequadas no solo. A recomendação de adubação para macronutrientes e micronutrientes foi baseada nas diretrizes para cultivo em vasos (DA SILVA et al., 2017) e nas necessidades nutricionais da cultura da cana-de-açúcar.

2.2 Tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi realizado em esquema fatorial 2 × 4. Os tratamentos incluíram dois níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura - ET_c) e quatro doses de Si: 0 (controle), 78, 117 e 156 kg ha⁻¹, equivalentes a 0, 39, 58 e 78 mg dm³ por vaso, respectivamente. Os tratamentos foram dispostos em delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro repetições.

A escolha dos níveis de irrigação de 50 e 20% da ET_c teve como objetivo simular diferentes condições de disponibilidade hídrica em campo, típicas de regiões marginais que enfrentam problemas de déficit hídrico, variando de moderado a severo. Esses tratamentos permitiram avaliar a resposta da cana-de-açúcar a diferentes graus de déficit hídrico.

As doses de Si foram estabelecidas com base nas recomendações para a cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.), que sugere a aplicação de 300,0 e 450,0 kg ha⁻¹ de sílica amorfa (26% de Si), equivalendo a 78,0 e 117,0 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente (JOHNSON et al., 2022). Além disso, foi testada uma dose de 600,0 kg ha⁻¹ de sílica amorfa, equivalente a 156,0 kg ha⁻¹ de Si (Agripower, NSW, Austrália).

2.3 Sistema de irrigação e manejo da água

A irrigação foi realizada utilizando água proveniente do sistema de abastecimento local da casa de vegetação, armazenada em dois reservatórios, cada um com capacidade de 100 L. O sistema de irrigação foi por gotejamento, e consistiu em mangueiras cegas de polietileno de baixa densidade (pressão nominal de 30 e diâmetro interno de 16 mm), equipadas com emissores autocompensantes de vazão nominal de 2,0 L/h (Gotejador Netafim PCJ CNL), posicionados em cada vaso de 80 L, com espaçamento de 0,50 m.

O sistema foi projetado com uma unidade de abastecimento de água composta por dois reservatórios de 100 L, conectados a uma central de controle e linhas de distribuição. Esses reservatórios eram alimentados com água, destinada à irrigação do experimento. O sistema incluiu duas eletrobombas de 0,5 CV, responsáveis por bombear a água dos reservatórios para as linhas de distribuição, e dois filtros modulares de tela de ¾” para a remoção de partículas sólidas indesejadas. Além disso, foram instaladas duas válvulas de esfera para o controle manual da vazão de água para cada tratamento, dois manômetros para garantir a pressão de serviço do sistema de irrigação em 10 m.c.a., e dois temporizadores digitais para programar o tempo de irrigação, automatizando o acionamento e desligamento das eletrobombas (Figura 4).

Cada reservatório de 100 L foi equipado com uma eletrobomba de 0,5 CV, um filtro e um temporizador digital, formando dois conjuntos independentes. Esses conjuntos asseguraram o transporte eficiente da água para as linhas de distribuição, utilizando tubulações com diâmetro de 20 mm, que estavam conectadas a mangueiras cegas. As duas linhas centrais principais eram conectadas a linhas derivadas, que por sua vez alimentavam subunidades de irrigação. Essas subunidades eram compostas por tubulações laterais com pressão nominal de 10 m.c.a e diâmetro nominal de 16 mm, que integravam os emissores às linhas de distribuição de água, conforme os tratamentos estabelecidos (Figura 4).

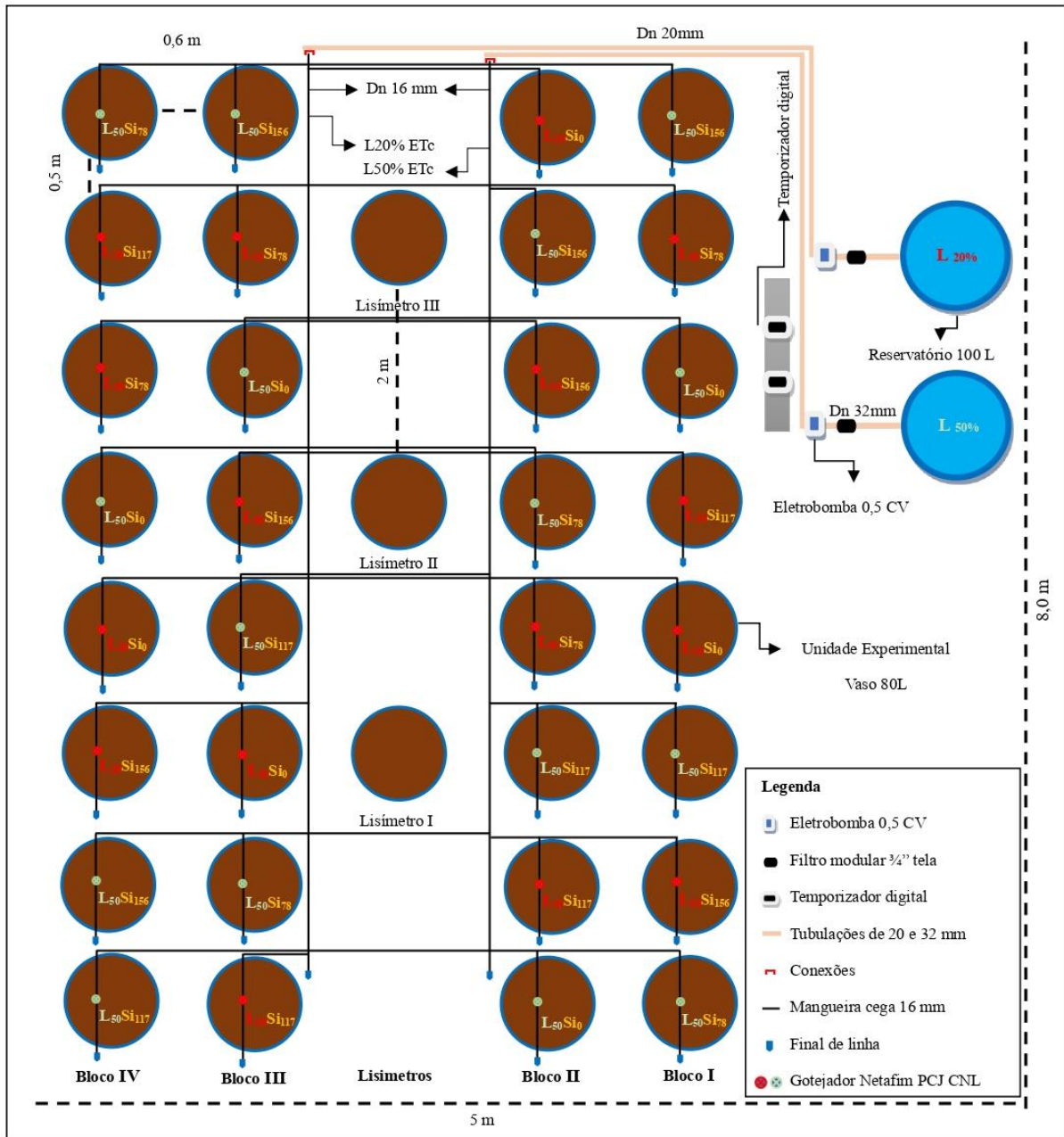


Figura 3. Esquema experimental e do sistema de irrigação

O tempo de irrigação para cada tratamento foi determinado a cada dois dias, considerando o volume bruto (V_b) de irrigação requerido. Esse volume foi calculado com base na relação entre o volume evapotranspirado (V_e) para 100% da ET_c e a eficiência de aplicação do sistema de irrigação, que foi de 96,6%, conforme determinado em um ensaio de uniformidade de distribuição de água, realizado de acordo com a metodologia proposta por Merriam e Keller (1978).

O cálculo do tempo de irrigação foi feito usando a razão entre o volume bruto de irrigação (V_b) e a vazão do gotejador (q_e) ($T_i = V_b/q_e$). As lâminas de déficit foram aplicadas

de acordo com os tratamentos, consistindo na reposição de frações variadas de 0,5 e 0,2 da ETc (50% e 20% da ETc). Antes da aplicação dos tratamentos com os déficits hídricos a irrigação foi realizada com 100% da ETc, mantendo o solo na capacidade de campo. A diferenciação dos tratamentos começou aos 60 DAP. O horário escolhido para a irrigação foi às 15:00 h, considerado um período mais ameno, o que ajuda a evitar o estresse térmico nas plantas na casa de vegetação.

A ETc foi estimada diariamente através da média do balanço hídrico de três lisímetros de percolação com capacidade de 80 L de maneira direta, conforme equação 1 (REICHARDT e TIMM, 2022) (Figura 4a, b), cultivados com a mesma cultura avaliada no experimento (cana-de-açúcar).

$$ETc = I - D \quad \text{Eq. 1}$$

Onde,

ETc é a evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}), I é a água colocada (irrigação) e D é a água percolada (drenagem).

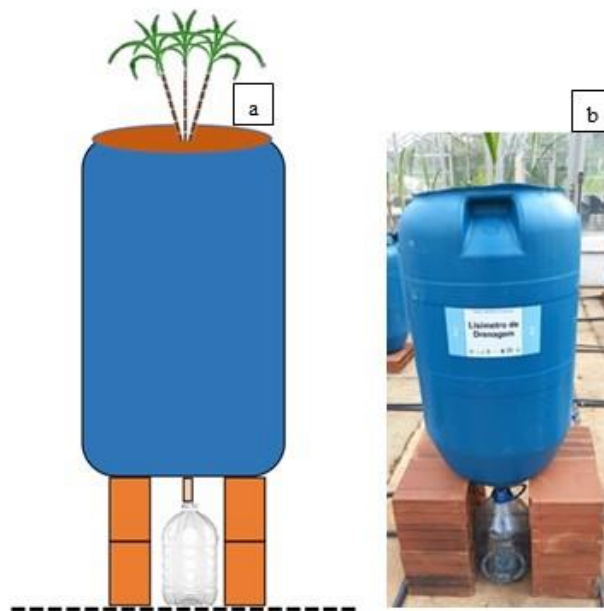


Figura 4. Lisímetro de drenagem, dispositivo utilizado para medir a quantidade de água que percola pelo solo.

O balanço hídrico nos lisímetros foi realizado diariamente, com medições a cada 24 h, para determinar o consumo total de água pela cultura. Este consumo foi obtido pela diferença entre a quantidade de água aplicada (irrigação) e a quantidade percolada (drenagem) (Equação 1). Os lisímetros foram inseridos na parte central da área experimental espaçados em 2,0 m entre plantas e 0,5 m entre linhas (Figura 3), dispostos sobre bancada de tijolo a 0,50 m de altura do piso com um coletor para medir a água percolada (Figura 4a,b).

2.4 Variáveis avaliadas

2.4.1 Altura do colmo, diâmetro do colmo, número de folhas verdes, número de perfilhos, percentual de folhas secas e área foliar

Aos 145 DAP a altura do colmo foi medida considerando da base até a inserção da primeira folha totalmente desenvolvida. O diâmetro do colmo foi medido a 15 cm da base da planta. O número de folhas verdes e perfilhos foram determinados por contagem. O percentual de folhas secas foi obtido a partir da relação do número de folhas secas pelo número de folhas total (secas + verdes), multiplicado por 100. A área foliar foi determinada medindo o comprimento e a largura na porção mediana da folha +3, e contando-se o número de folhas verdes (folha totalmente expandida com o mínimo de 20% de área verde, contada a partir da folha +1), aplicando-se a equação 2 (HERMANN e CÂMARA, 1999).

$$AF = C \times L \times 0,75 \times (N + 2) \quad \text{Eq 2.}$$

Em que,

AF = Área foliar, m²;

C = Comprimento da folha, m;

L = Largura da folha, m;

0,75 = Fator de correção para área foliar da cultura, adimensional

2 = Fator de ajuste referente as folhas que não estão completamente expandidas, adimensional;

N = Número de folhas verdes (unidades por planta)

2.4.2 Produção de massa seca

Aos 150 DAP, as plantas de cana-de-açúcar foram colhidas e divididas em folhas verdes, folhas secas e colmos. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até massa constante para obtenção da massa seca de cada parte da planta.

2.4.3 Conteúdo relativo de água

A determinação do conteúdo relativo de água (CRA) foi realizada na folha +2, aos 150 DAP, onde foram coletados dez discos foliares, cada um medindo 28,3 mm². Os discos foram imediatamente pesados para obtenção da massa fresca (Mf). Posteriormente, as amostras foram reidratadas em água destilada por 24 h para obtenção da massa túrgida (Mt). As amostras foram então secas em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C por 48 h para obtenção da massa seca (Ms). O CRA foi calculado aplicando-se a equação 3 (BARRS e WEATHERLEY, 1962).

$$CRA = \left[\frac{(Mf - Ms)}{(Mt - Ms)} \right] \times 100 \quad \text{Eq. 3}$$

2.4.4 Potencial hídrico foliar

Aos 150 DAP, o potencial hídrico foliar (Ψ_w) foi determinado na extremidade da lâmina foliar da folha +2 utilizando uma câmara de pressão Scholander (615D da PMS Instrument Company). A pressão foi aplicada até a exsudação do corte feito no pecíolo da folha (Turner, 1981). As medições ocorreram nas primeiras horas da madrugada, entre as 1h e 3h.

2.4.5 Potencial osmótico

Aos 150 DAP, a determinação da osmolalidade total do tecido foliar foi realizada com as folhas utilizadas para determinação do potencial hídrico. Após maceração em nitrogênio líquido, a seiva obtida foi filtrada em tecido musseline e centrifugada a 10.000 g por 15 min a 4°C. Uma alíquota de 10 µL do sobrenadante foi utilizada para a determinação da osmolalidade, com um osmômetro de pressão de Vapor (VAPRO, Modelo 5600, Wescor). Os valores obtidos em milimoles por quilograma foram convertidos em potencial osmótico (Ψ_o), por meio da equação 4 (KIRKHAM, 2014; HILLEL, 2007; SOUZA et al., 2012).

$$\Psi_o \text{ (MPa)} = - \text{moles do soluto} \times R \times T \quad \text{Eq. 4}$$

Em que,

R é a constante universal dos gases (0,008314 MPa. Kg. K⁻¹. mmol⁻¹) e T é a temperatura em Kelvin.

2.4.6 Ajustamento osmótico

O ajustamento osmótico (AO) foi determinado no terço médio da lâmina foliar das mesmas folhas que foram utilizadas para determinação do potencial hídrico aos 150 DAP. As folhas foram postas para saturar em sacos plásticos totalmente preenchidos por água destilada, por 24h a 4°C no escuro. Após atingirem o completo turgor, as folhas foram secas em papel toalha e após esse processo foram maceradas em nitrogênio líquido e a seiva extraída foi filtrada e centrifugada a 10.000 g por 15 minutos a 4°C. Uma alíquota de 10 µL do sobrenadante foi utilizada para a determinação da osmolalidade, com um osmômetro de pressão de Vapor (VAPRO, Modelo 5600, Wescor). Os valores obtidos em milimoles por quilograma foram convertidos em potencial osmótico (Ψ_o) a partir da equação de Van't Hoff. Os resultados para o ajustamento osmótico, foram obtidos a partir da diferença entre o potencial osmótico das plantas controle em relação as plantas estressadas por meio da equação 5 (BLUM, 1989).

$$AO_{\text{total}} = \Psi_{Oc}^{100} - \Psi_{OS}^{100} \quad \text{Eq. 5}$$

Em que,

AO_{total} = Ajustamento osmótico total;

Ψ_{Oc}^{100} = Potencial osmótico das plantas controle a pleno turgor;

Ψ_{OS}^{100} = Potencial osmótico das plantas estressadas a pleno turgor.

2.4.7 Índice de extravasamento de eletrólitos

Aos 150 DAP, a integridade da membrana celular foi avaliada por meio da observação do vazamento de eletrólitos do tecido foliar. Foram coletados dez discos foliares (28,3 mm² cada) da folha +1 entre 9h e 11h da manhã. Os discos foram emergidos em água destilada por 2 h e a condutividade elétrica (CE₁) da solução foi lida utilizando um condutivímetro (AK51, Akso, Brasil). As amostras foram autoclavadas a 121 °C por 20 min e a condutividade elétrica

final (CE₂) foi determinada após resfriamento. O índice de extravasamento de eletrólitos foi determinado (IEE) a partir da equação 6 (DIONISIO-SESE e TOBITA, 1998).

$$IEE = \frac{CE_1}{CE_2} \times 100 \quad \text{Eq. 6}$$

2.4.8 Fluorescência da Clorofila

Aos 148 DAP, a fluorescência da clorofila das plantas foi avaliada ao que se refere à fluorescência inicial (F_o), máxima (F_m), variável (F_v) e eficiência quântica do fotossistema II (F_v/F_m). As leituras foram realizadas na folha +1 entre 8 e 10h, utilizando um fluorômetro portátil (Marca: Fluorpen, Modelo: FP-100) (LICHTENTHALER et al., 2005). Antes das leituras, as folhas foram mantidas no escuro por 30 min.

2.4.9 Índice de SPAD, conteúdo de clorofila e carotenoides

Aos 148 DAP, foram realizadas leituras no terço médio da folha +1 entre 8 e 10h utilizando um medidor de clorofila SPAD-502 (Minolta Corp., Ramsey, NJ, EUA), para estimar o conteúdo de clorofila (índice SPAD). Aos 150 DAP para quantificar o conteúdo de pigmentos fotossintéticos nas lâminas foliares, amostras pesando aproximadamente 0,1 g de discos foliares (28,3 mm² cada), coletados do terço médio da folha +1 foram submersas em frascos previamente cobertos com papel alumínio, contendo 10 mL de acetona 80% P.A. As amostras permaneceram nesta solução até que a completa descoloração fosse alcançada. As leituras foram feitas em espectrofotômetro UV-visível nos comprimentos de onda de 663 nm para clorofila a (Chl a), 647 nm para clorofila b (Chl b) e 470 nm para carotenóides (LICHTENTHALER, 1987). Os valores obtidos foram utilizados para calcular a concentração de pigmentos, expressa em mg g⁻¹ de massa fresca (MF).

2.4.10 Trocas gasosas foliares

Aos 148 DAP, as avaliações das trocas gasosas das plantas foram realizadas no terço médio da folha +1. Os parâmetros de troca gasosa foram medidos por meio de um Analisador Portátil de Gás Infravermelho (IRGA) (LICOR Li- 6400). Os dados foram coletados no período

da manhã, entre 9h e 12h, horário de brilho do sol intenso e elevada demanda evapotranspiratória, em sistema aberto com a câmara foliar ajustada para densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos, de $800 \pm 1100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, aproximadamente, temperatura ambiente e concentração de CO_2 capsular.

A fotossíntese líquida (A), a transpiração foliar (E), a condutância estomática (Gs) e a concentração intracelular de CO_2 (Ci) foram determinadas após estabilização (3 - 5 min). A eficiência do uso da água (EUA) foi calculada pela razão entre A e E. Por sua vez, a eficiência instantânea de carboxilação (Eic) foi calculada pela razão entre A e Ci.

2.4.11 Análise de silício (Si)

Aos 150 DAP foi determinado o teor de Si a partir da extração com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e solução de hidróxido de sódio (NaOH) de acordo com a metodologia descrita por Kraska e Breitenbeck (2010). As amostras foram então medidas utilizando um espectrofotômetro (B442, Micronal, BR) em comprimento de onda de 410 nm para determinar o teor de Si, conforme indicado por Korndörfer et al. (2004). O acúmulo de Si foi determinado nas folhas e colmos sendo calculado com base no teor de Si de cada parte e sua respectiva massa seca, conforme equação 7.

$$\text{Acúmulo de Si (mg/planta)} = \frac{[(\text{teor de Si mg kg}^{-1}) * (\text{massa da planta g por planta})]}{1000} \quad \text{Eq. 7}$$

2.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância por meio do teste F ($p \leq 0,05$) após verificação da normalidade e homogeneidade das variâncias (teste W de Shapiro-Wilk e teste de Bartlett). A análise fatorial foi utilizada para testar os principais efeitos do nível de irrigação (ETc) e do suprimento de silício (Si) e suas interações (ETc \times Si), onde o número de parcelas foi de 32 unidades experimentais.

Os dados quantitativos, correspondentes às doses de Si, foram analisados por meio de modelos de regressão linear e polinomial. Os dados qualitativos, correspondentes aos níveis de reposição da evapotranspiração da cultura (ETc), foram analisados pelo teste de comparação de médias de Tukey ($p \leq 0,05$). A seleção do modelo de regressão baseou-se na significância dos coeficientes de regressão e no maior valor do coeficiente de determinação.

A diferença entre os tratamentos também foi analisada por meio de análise correlação para expressar graficamente a relação funcional entre as estimativas dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis nas duas condições hídricas. As análises estatísticas foram realizadas utilizando a linguagem de programação R (versão 4.4.0, R Core Team).

3. RESULTADOS

A interação entre os fatores (ETc x Si) foi significativa para o acúmulo de Si nas folhas e colmos ($p < 0,05$) em *Saccharum officinarum* L. (cana-de-açúcar) (Figura 5a, b). A aplicação de Si via solo promoveu um aumento no acúmulo de Si nas plantas sob ambas as condições de irrigação (50% e 20% da ETc), com um ajuste polinomial quadrático. Os acúmulos máximos de Si nas folhas foram de 6,23 g por planta, e nos colmos, 1,23 g por planta, obtidos com doses de 105,0 e 78,6 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, na condição de 50% da ETc (Figura 5a, b). Entretanto, na condição de 20% da ETc, foi observado um menor acúmulo de Si nas folhas e nos colmos, com valores máximos de 5,73 e 0,87 g por planta, respectivamente, obtidos com as doses de 81,3 e 91,7 kg ha⁻¹ de Si (Figura 5a, b). A quantidade acumulada de Si variou conforme as partes da planta, seguindo a ordem: folhas > colmos.

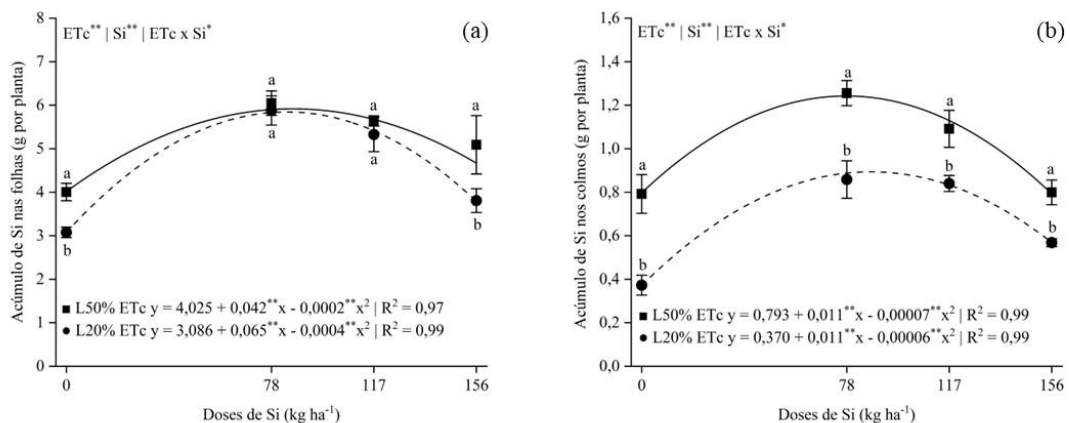


Figura 5. Acúmulo de silício (Si) nas folhas (a) e colmos (b) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha⁻¹). L50% (Lâmina de 50% da ETc) e L20% (Lâmina de 20% da ETc). As letras indicam diferenças significativas entre os níveis de irrigação (ETc) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e ** Indicam significância nos níveis de probabilidade de 1% e 5%, respectivamente, com base no teste F. As barras representam o desvio padrão; $n = 4$.

Para a altura do colmo de cana-de-açúcar houve efeito significativo ($p < 0,01$) para os fatores isolados de níveis de ETc e doses de Si (Figura 6a, b). A condição de 20% da ETc diminuiu a altura do colmo em 29,13% quando comparada a 50% da ETc (Figura 6a). No entanto, a nutrição com Si proporcionou um efeito benéfico ao reduzir as perdas na altura do colmo em plantas submetidas ao déficit hídrico, alcançando um valor máximo de 1,71 m na dose de Si 82,1 kg ha⁻¹ (Figura 6b). Quanto ao diâmetro do colmo, apenas o fator ETc isolado apresentou efeito significativo ($p < 0,05$) (Figura 6c), sendo que a condição de 20% da ETc resultou em uma redução de 5,20% no diâmetro do colmo quando comparada a condição de 50% da ETc.

A nutrição com Si proporcionou um efeito benéfico que aumentou o número de folhas verdes das plantas em ambas as condições de déficit hídrico (50 e 20% da ETc) (Figura 6d). Foi observado efeito de interação entre níveis de ETc e doses de Si ($p < 0,01$), com ajuste polinomial quadrático. Os valores máximos de folhas verdes foram de 29,28 e 15,97 folhas em doses de Si de 111,9 e 81,7 kg ha⁻¹ para 50 e 20% da ETc, respectivamente (Figura 6d). Para a percentagem de folhas secas, a condição de maior déficit hídrico, 20% da ETc resultou em um aumento de 7,1% no percentual de folhas secas em comparação com o cultivo na condição de 50% da ETc (Figura 6e). No entanto, a aplicação de Si diminuiu linearmente os valores do percentual de folhas secas em 4,9, 7,3 e 9,8 % com as doses de Si de 78,0, 117 e 156 kg ha⁻¹, respectivamente, em plantas de cana-de-açúcar (Figura 6f).

O número de perfilhos (Figura 6g) apresentou efeito significativo ($p < 0,01$) apenas em resposta aos níveis de ETc. Observou-se que, sob condição de 20% da ETc (déficit hídrico severo) houve uma redução de 31,6% no número de perfilhos em comparação com a condição de 50% da ETc. A área foliar das plantas de cana-de-açúcar foi influenciada pelos efeitos interativos dos níveis de ETc e das doses de Si ($p < 0,01$). Observou-se que a dose de Si de 89,8 kg ha⁻¹ resultou no valor máximo de área foliar de 20.819,94 cm² na condição de 50% da ETc. No entanto, sob a condição hídrica de 20% da ETc, não foi observada diferença significativa entre as doses de Si na área foliar, apresentando um valor médio de 9.546,48 cm² (Figura 6h).

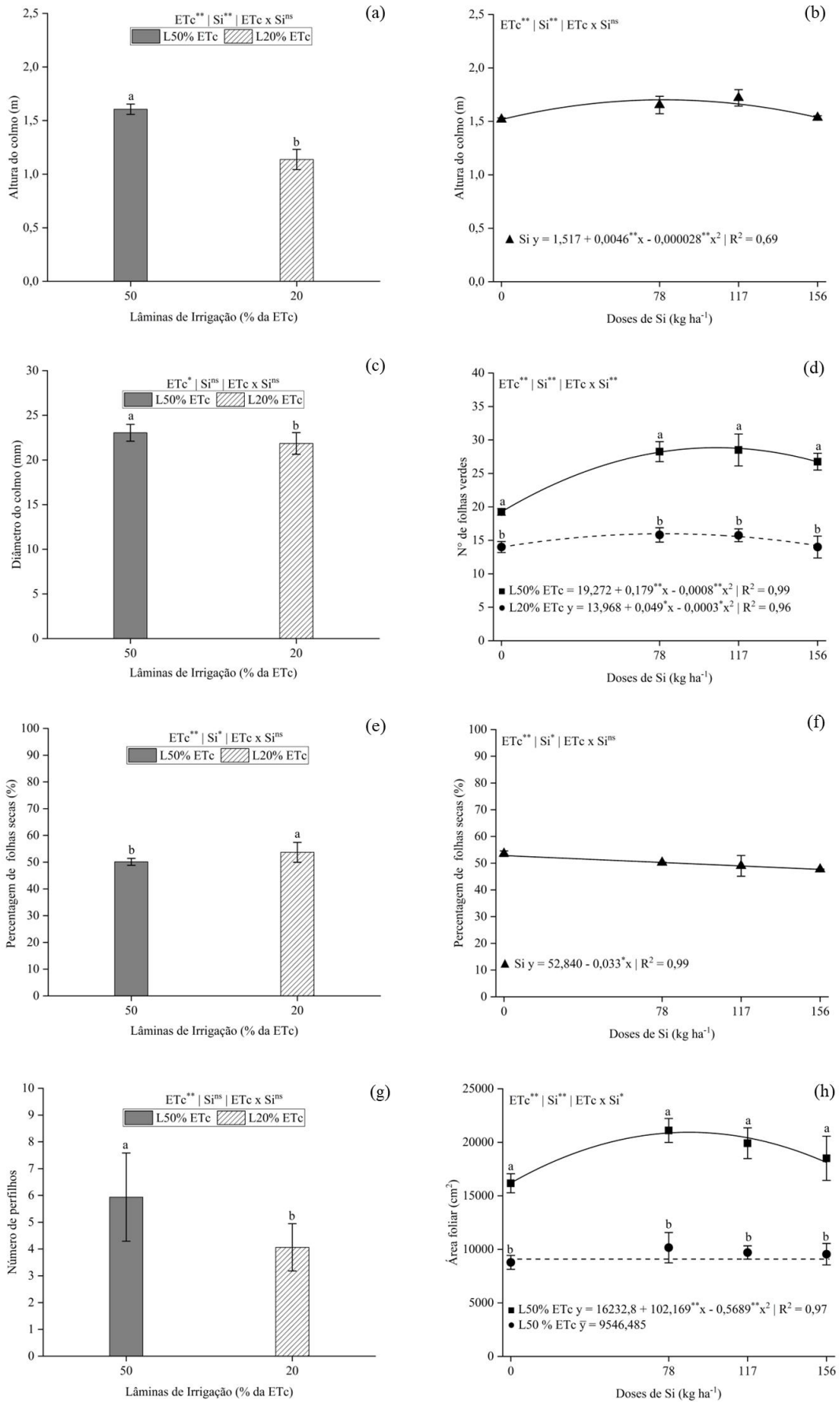


Figura 6. Altura do colmo (a, b), diâmetro do colmo (c), número de folhas verdes (d), percentagem de folhas secas (e, f), número de perfilhos (g) e área foliar (h) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha⁻¹). L50% (Lâmina de 50% da ETc) e L20% (Lâmina de 20% da ETc). As letras indicam diferenças significativas entre lâminas de irrigação (ETc) em cada dose de Si (d, h), lâminas de irrigação (ETc) (a, c, e, g) e entre as doses de Si (b, f) ($p < 0,05$ teste de Tukey). ^{ns}, * e ** Indicam não significativo e significância nos níveis de probabilidade de 5% e 1%, respectivamente, com base no teste F. As barras representam o desvio padrão; $n = 4$.

Para a massa seca das folhas (Figura 7a, b) e da parte aérea (Figura 7d, e) foi observado efeito significativo ($p < 0,01$) para os fatores isolados níveis de ETc e doses de Si. O déficit hídrico severo (20% da ETc) resultou em uma redução de 14,06% na massa seca das folhas em comparação com a condição de 50% da ETc (Figura 7a). Entretanto, a aplicação de Si na dose de 83,7 kg ha⁻¹ levou a uma produção máxima de massa seca das folhas de 420,58 g por planta (Figura 7b). A massa seca da parte aérea foi reduzida em 20,3% sob déficit hídrico severo (20% da ETc) em comparação ao déficit hídrico moderado (50% da ETc) (Figura 7d). Contudo, a adubação com Si em cana-de-açúcar aumentou a massa seca da parte aérea, com produção máxima estimada de 600,09 g por planta para uma dose de Si de 80,7 kg ha⁻¹ (Figura 7e).

Na produção da massa seca dos colmos em plantas de cana-de-açúcar, foi observada efeito de interação entre níveis de ETc e as doses de Si ($p < 0,05$), com ajuste polinomial quadrático para as doses de Si em ambas as condições hídricas estudadas. Os resultados indicaram valores máximos de 180,61 e 128,69 g de massa seca do colmo por planta, obtidos com doses de Si de 84,2 kg ha⁻¹ e 89,5 kg ha⁻¹, respectivamente, para as condições de 50% e 20% da ETc (Figura 7c).

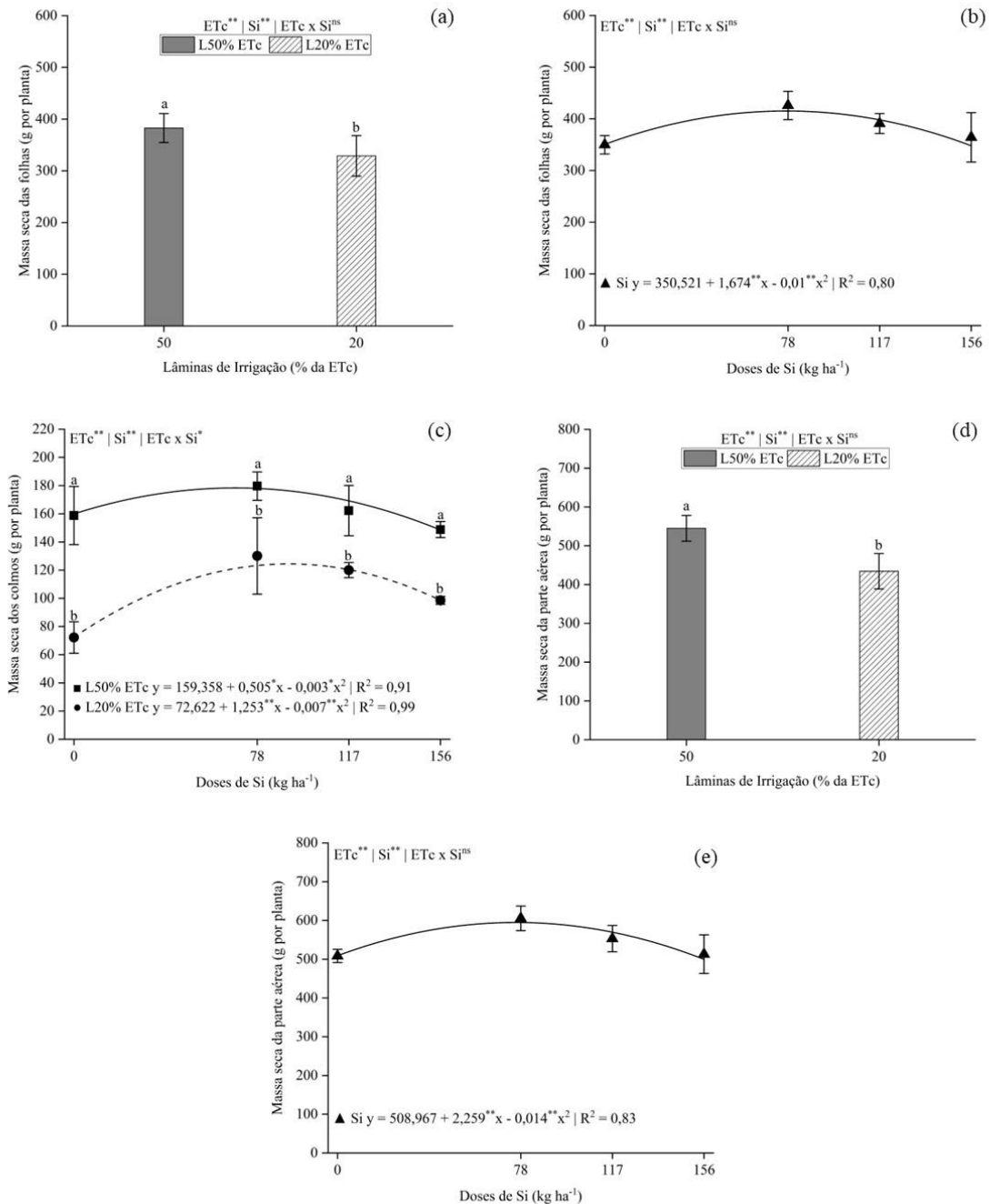


Figura 7. Massa seca das folhas (a, b), dos colmos (c) e da parte aérea (d, e) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura - ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha⁻¹). L50% (Lâmina de 50% da ETc) e L20% (Lâmina de 20% da ETc). As letras indicam diferenças significativas entre lâminas de irrigação (ETc) em cada dose de Si (b), lâminas de irrigação (ETc) (a, c) e entre as doses de Si (d) ($p < 0,05$ teste de Tukey). ^{ns}, * e ** Indicam não significativo e significância nos níveis de probabilidade de 5% e 1%, respectivamente, com base no teste F. As barras representam o desvio padrão; $n = 4$.

O conteúdo relativo de água (CRA) apresentou efeito de interação entre níveis de ETc e doses de Si ($p < 0,05$). Observou-se um ajuste polinomial quadrático para a condição de 20% da ETc, com um valor máximo de 87,05% no CRA, alcançado com a aplicação de 91,3 kg ha⁻¹ de Si (Figura 8a). Porém, sob a condição hídrica de 50% da ETc, não houve diferença significativa entre as doses de Si, com um valor médio para CRA de 89,79%.

O potencial hídrico apresentou efeito de interação ($p < 0,05$) entre os níveis de irrigação e doses de Si, com ajuste polinomial quadrático. Os potenciais hídricos foliares máximos foram - 0,27 e - 1,30 MPa nas doses de Si de 80,0 e 95,0 kg ha⁻¹ para os níveis de 50% e 20% da ETc, respectivamente (Figura 8b). Para o potencial osmótico, ocorreu uma redução de 23,5% quando as plantas de cana-de-açúcar foram submetidas a condição de 20,05% da ETc, em comparação com aquelas que receberam 50% da ETc (Figura 8c). Além disso, a aplicação da dose de 82,5 kg ha⁻¹ de Si resultou em um valor mínimo de -1,46 MPa (Figura 8d).

Para o ajustamento osmótico a aplicação de 78,0 kg ha⁻¹ de Si proporcionou o maior ajustamento osmótico (0,39 Mpa), com aumento de 12,0% em comparação com o tratamento controle (0,0 kg ha⁻¹ de Si) (Figura 8e). O índice de extravasamento de eletrólitos apresentou interações significativas entre os níveis de ETc e as doses de Si ($p < 0,05$), exibindo um ajuste polinomial quadrático decrescente (Figura 8f). Os valores mínimos de extravasamento de eletrólitos, de 18,21 e 20,84, foram observados com doses de Si de 107,5 e 113,8 kg ha⁻¹, nos níveis de irrigação de 50% e 20% de ETc, respectivamente (Figura 8f).

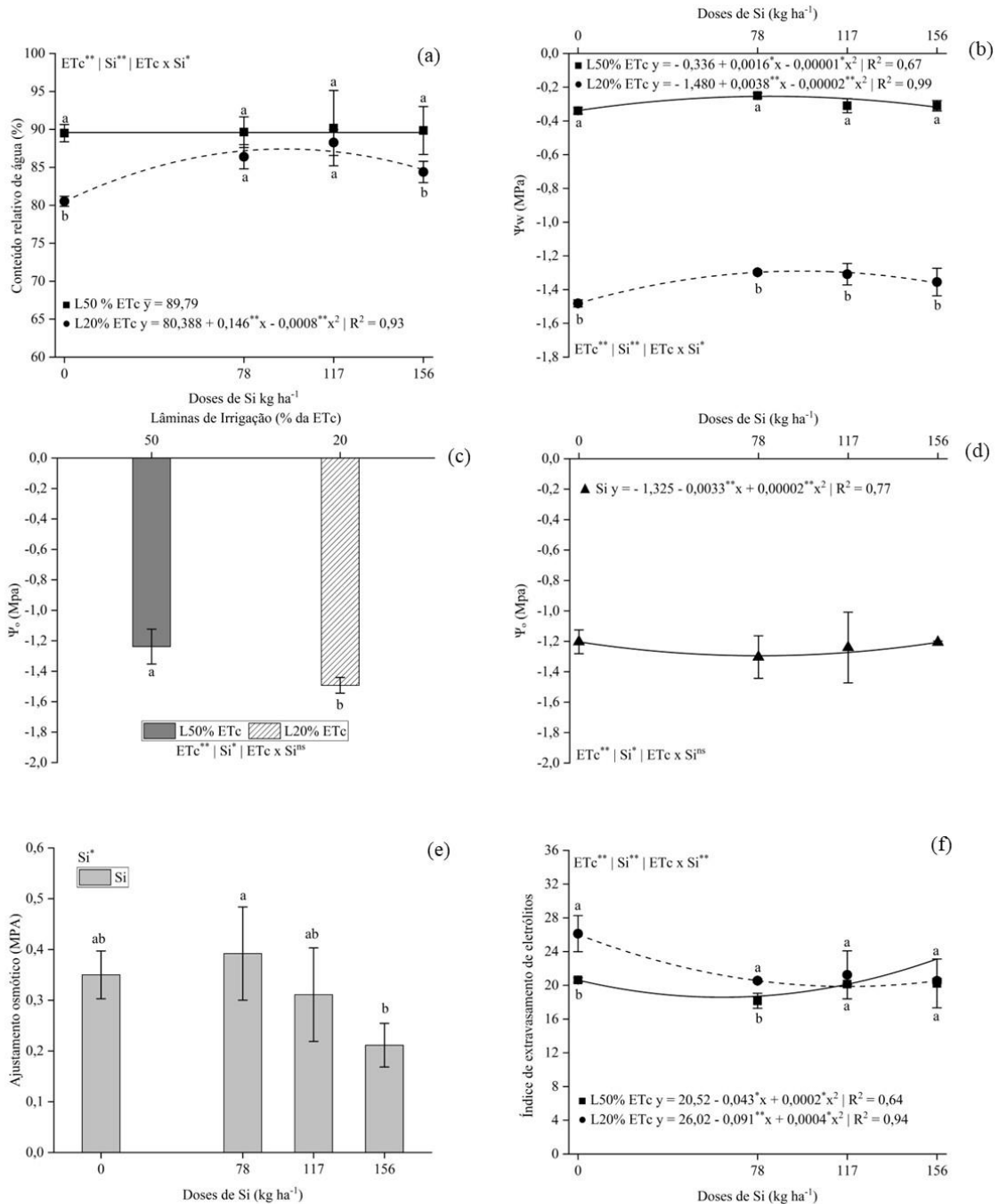


Figura 8. Conteúdo relativo de água (a), potencial hídrico (Ψ_w) (b), potencial osmótico (Ψ_o) (c, d), ajustamento osmótico (e) e índice de extravasamento de eletrólitos (f) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha⁻¹). L50% (Lâmina de 50% da ETc) e L20% (Lâmina de 20% da ETc). As letras indicam diferenças significativas entre lâminas de irrigação (ETc) em cada dose de Si (a, b, d, f), lâmina de irrigação (ETc) (c) e entre as doses de Si (e) ($p < 0,05$ teste de Tukey). ns, * e ** Indicam não significativo e significativo nos níveis de probabilidade de 5% e 1%, respectivamente, com base no teste F. As barras representam o desvio padrão; $n = 4$.

A fluorescência da clorofila *a* em cana-de-açúcar foi influenciada significativamente pelos fatores ETc e doses de Si ($p < 0,01$) e $p < 0,05$) de forma independente. A Fo (Figura 9a), Fm (Figura 9b), Fv (Figura 9d) e Fv/Fm (Figura 9f) foi reduzida em 5,8; 3,9; 4,6; e 3,3% respectivamente, na condição hídrica de 20% da ETc em comparação com plantas submetidas a condição hídrica de 50% da ETc. No entanto, a adubação silicatada beneficiou a fluorescência da clorofila *a*, com valores máximos de 2770,51; 1991,66 e 0,70 na Fm, Fv e Fv/Fm (Figura 9c, e, g), com a utilização das doses de Si de 107,4; 114,1 e 83,3 kg Si ha⁻¹, respectivamente.

Para o conteúdo estimado de clorofila (índice SPAD), teores de Chl *a*, Chl *b*, Chl total e carotenoides foi observado efeito independente. Na condição de déficit hídrico de 50% da ETc as plantas de cana-de-açúcar aumentaram o índice SPAD, Chl *a*, Chl *b*, Chl total e carotenoides em 9,7; 15,6; 27,4; 17,9 e 14,8 % respectivamente, em comparação com as plantas sob a condição hídrica de 20% da ETc (Figura 10a, c, d, e, f). No entanto, o Si exerceu um efeito positivo significativo no índice de SPAD, com um ajuste polinomial quadrático em resposta às diferentes doses aplicadas. O valor máximo registrado foi de 37,80 SPAD em plantas tratadas com uma dose de 86,5 kg ha⁻¹ de Si (Figura 10b).

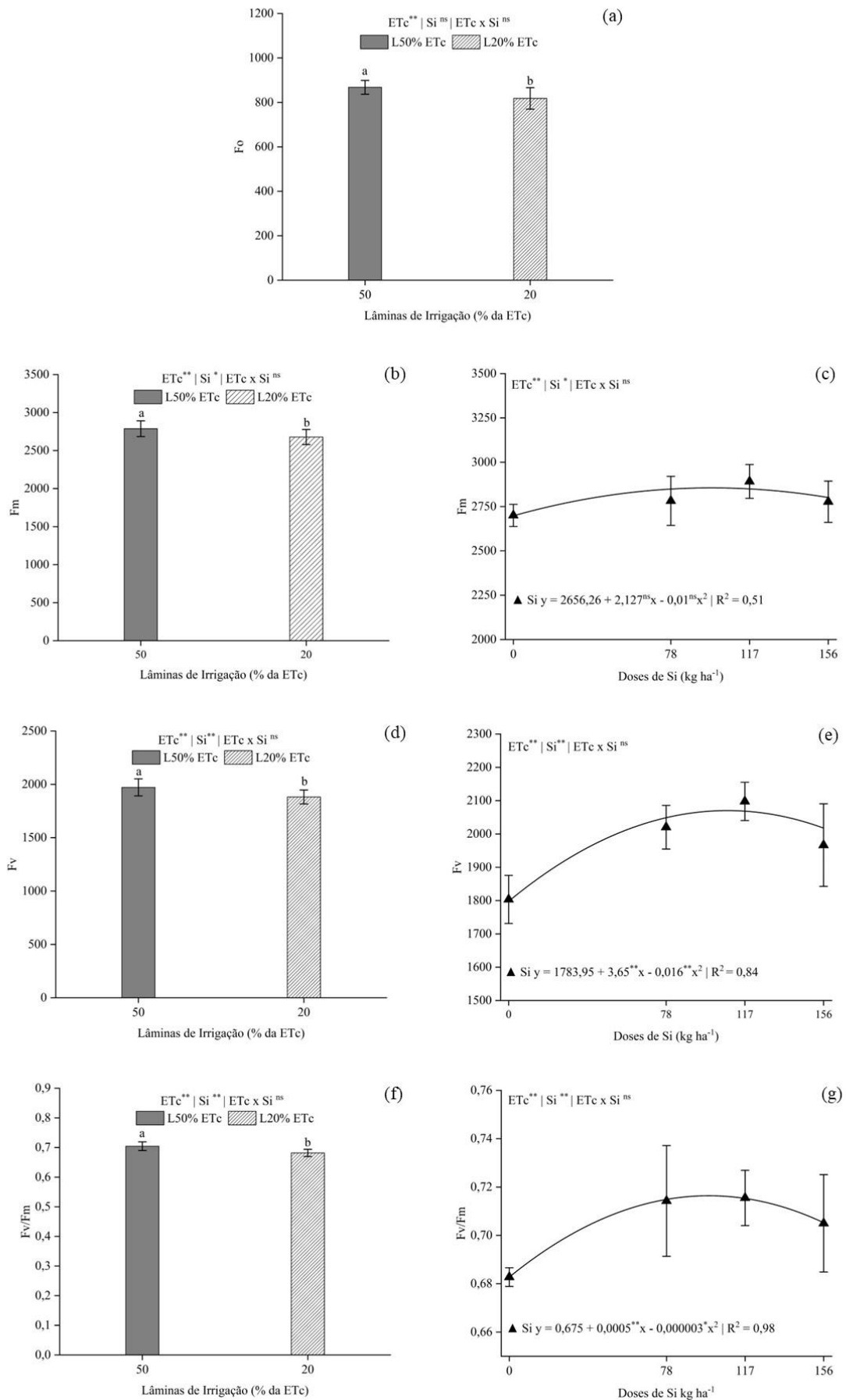


Figura 9. Fluorescência inicial (Fo) (a), fluorescência máxima (Fm) (b, c), fluorescência variável (Fv) (d, e) e eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm) (f, g) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha⁻¹). As letras indicam diferenças significativas entre lâminas de irrigação (ETc) (a, b, d, f) e entre as doses de Si (c, e, g) ($p < 0,05$, teste de Tukey). ^{ns}, * e ** Indicam não significativo e significativo nos níveis de probabilidade de 5% e 1%, respectivamente, com base no teste F. As barras representam o desvio padrão; $n = 4$.

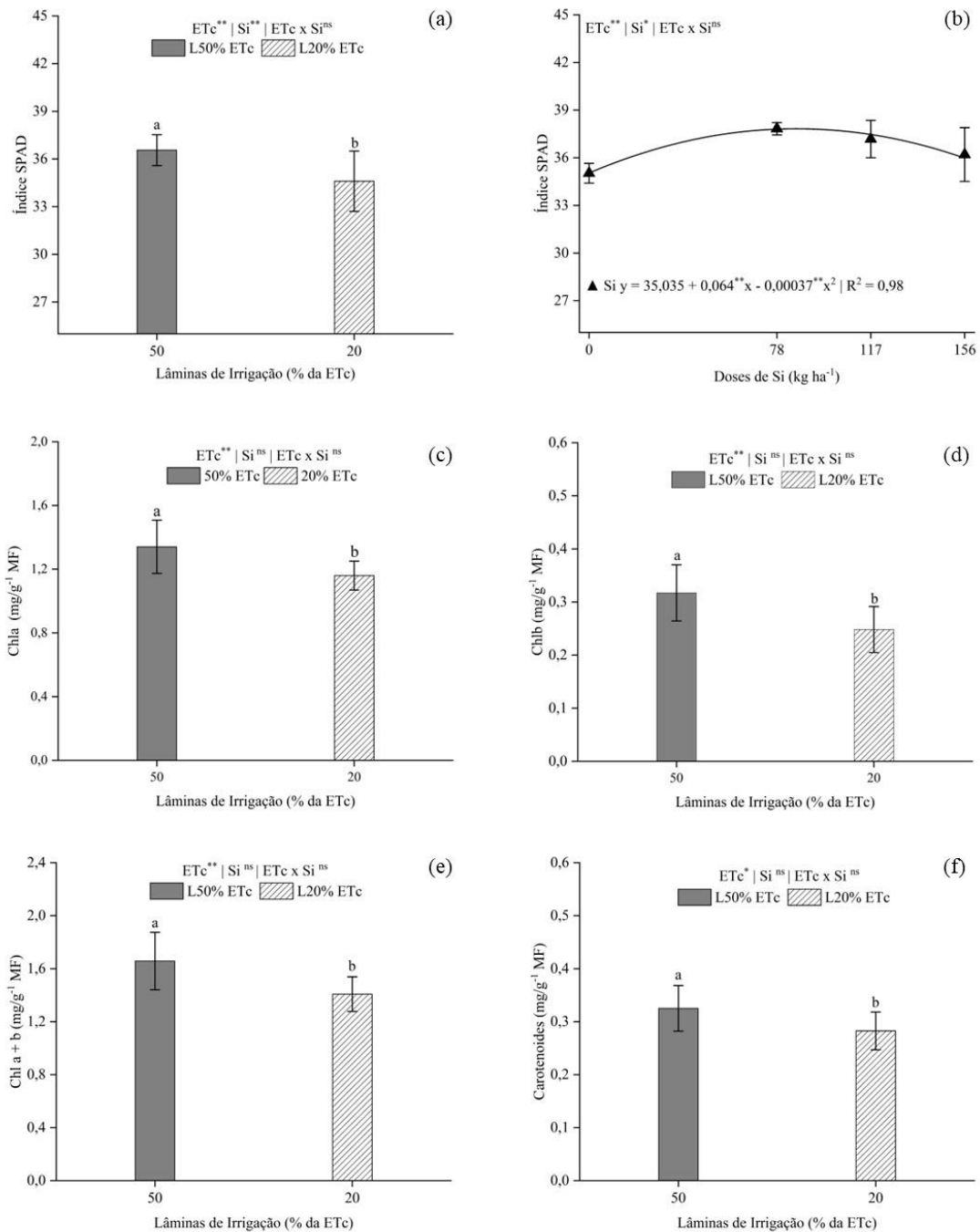


Figura 10. Índice SPAD (a, b), teor de clorofila a (Chl a) (c), teor de clorofila b (Chl b) (d), teor de clorofila total (Chl total) (e) e teor de carotenóides (f) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha⁻¹). As letras indicam diferenças significativas entre os níveis de irrigação (ETc) (a, c, d, e, f) e entre as doses de Si (b) ($p < 0,05$, teste de Tukey). ns, * e ** Indicam não significativo e significância nos níveis de probabilidade de 5% e 1%, respectivamente, com base no teste F. As barras representam o desvio padrão; $n = 4$.

A fotossíntese líquida (A) ($p < 0,01$) e a condutância estomática (Gs) ($p < 0,05$) da cana-de-açúcar apresentaram efeitos de interação (ETc x Si). Os resultados para as doses de Si foram ajustados a um modelo de regressão polinomial quadrática (Figura 11a, b). Os valores máximos de A foram 16,31 e 13,45 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, obtidos com as doses de Si de 108,0 e 84,0 kg ha^{-1} nas condições de 50% e 20% da ETc, respectivamente (Figura 11a). A condutância estomática (Gs) apresentou um ajuste linear para a condição de 50% ETc, com um incremento de 55,6% na Gs da menor dose (0,0 kg ha^{-1} de Si, testemunha) para a maior dose (156,0 kg ha^{-1} de Si). Em plantas sob a condição de 20% da ETc, o ajuste foi polinomial quadrático, com valores máximos de 0,06 $\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ na dose de Si de 80,0 kg ha^{-1} (Figura 11b). Em todas as doses de Si, as plantas sob a condição de 50% da ETc apresentaram maiores valores de A e Gs.

A concentração interna de CO_2 (Ci) e a taxa de transpiração (E) apresentaram efeitos significativos para os fatores isolados com teste de média (Figura 11c, e) e modelo polinomial quadrático (Figura 11d, f). A concentração interna de carbono e a taxa de transpiração na cana-de-açúcar diminuíram em 15,3% e 46,4%, respectivamente, quando as plantas foram submetidas à condição de 20% da ETc, em comparação com as plantas que receberam 50% da ETc (Figura 11c, e). No entanto, a aplicação das doses de Si de 104,0 e 110,0 kg ha^{-1} resultou em uma concentração máxima de Ci e E de 131,35 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ e 5,42 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente (Figura 11d, f).

As doses de Si de 87,5 kg ha^{-1} e 83,3 kg ha^{-1} beneficiaram a eficiência do uso da água (EUA), alcançando valores máximos de 2,81 e 4,05 $\text{CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ sob condições de 50% e 20% da ETc, respectivamente (Figura 12a). Sob a condição de 20% da ETc, as plantas de cana-de-açúcar apresentaram uma redução de 27,4% na eficiência instantânea de carboxilação (EIC) em comparação com o tratamento de 50% da ETc (Figura 12b). No entanto, a nutrição com Si proporcionou um aumento de 18,7% na EIC, ao comparar a menor dose de Si 0,0 kg ha^{-1} (testemunha) com a maior dose de Si 156,0 kg ha^{-1} (Figura 12c).

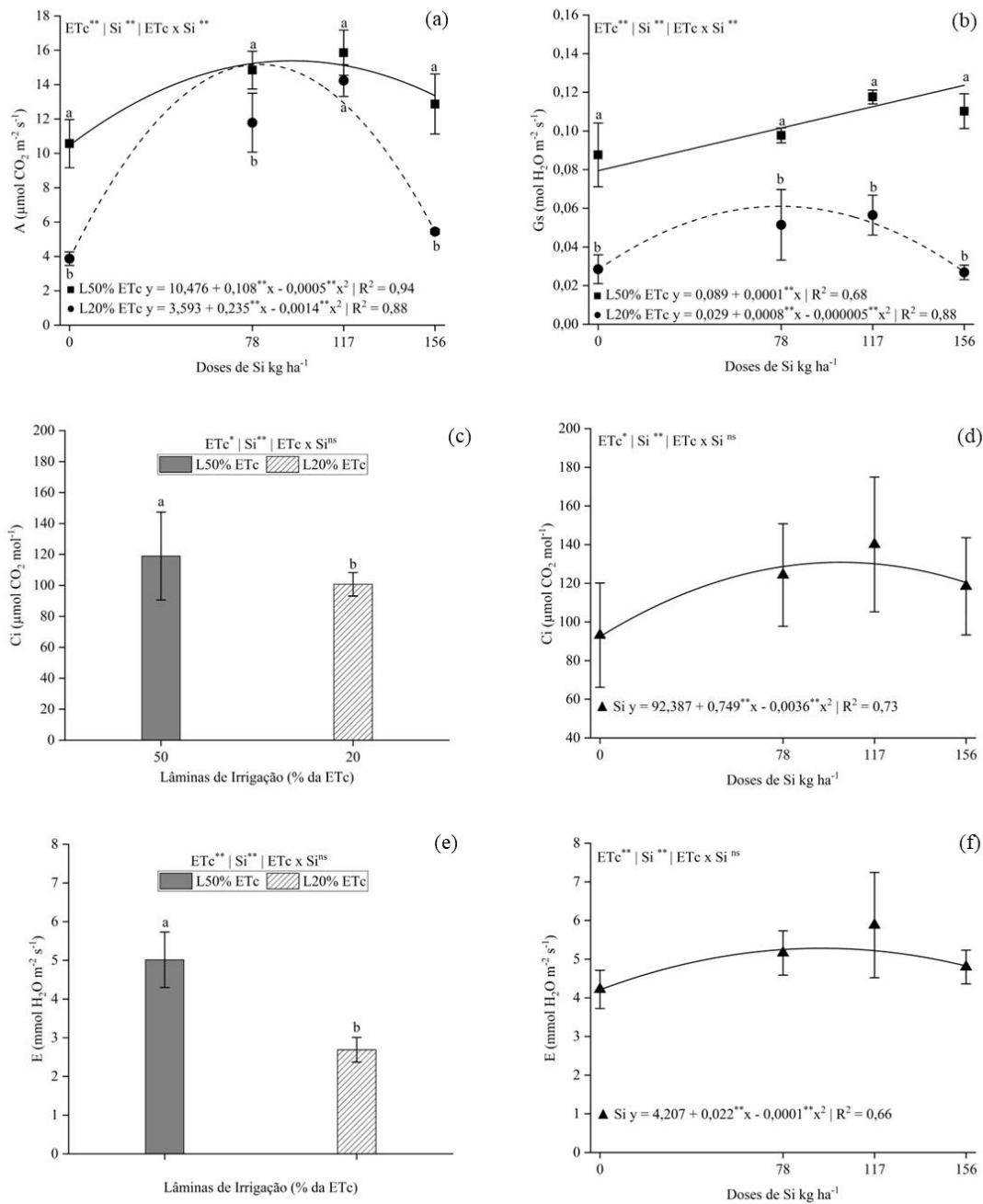


Figura 11. Fotossíntese líquida (A) (a), condutância estomática (Gs) (b), concentração interna de C (Ci) (c, d) e taxa de transpiração (E) (e, f) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha⁻¹). L50% (Lâmina de 50% da ETc) e L20% (Lâmina de 20% da ETc). As letras indicam diferenças significativas entre lâminas de irrigação (ETc) em cada dose de Si (a, b), lâminas de irrigação (ETc) (c, e) e entre as doses de Si (d, f) ($p < 0,05$ teste de Tukey). ^{ns}, * e ** Indicam não significativo e significativo nos níveis de probabilidade de 5% e 1%, respectivamente, com base no teste F. As barras representam o desvio padrão; $n = 4$.

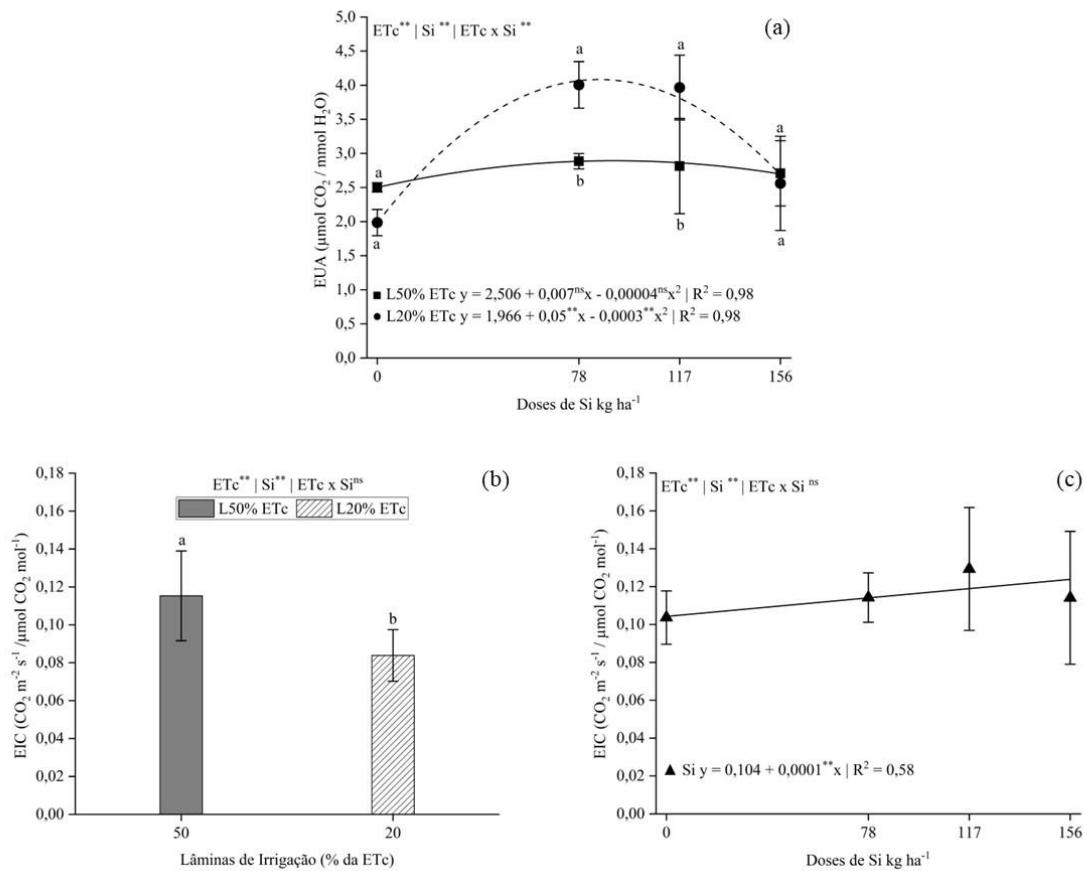


Figura 12. Eficiência do uso da água (EUA) (a) e eficiência instantânea de carboxilação (EIC) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha^{-1}). L50% (Lâmina de 50% da ETc) e L20% (Lâmina de 20% da ETc). As letras indicam diferenças significativas entre lâminas de irrigação (ETc) (a), entre as lâminas de irrigação (ETc) (b) e entre as doses de Si (d) ($p < 0,05$ teste de Tukey). ^{ns} e ^{**} Indicam não significativo e significativo nos níveis de probabilidade de 1%, respectivamente, com base no teste F. As barras representam o desvio padrão; $n = 4$.

Os coeficientes de correlação foram calculados para os parâmetros de crescimento, relações hídricas e fotossíntese sob condições de 50% da ETc (Figura 13a) e 20% da ETc (Figura 13b). A correlação de Pearson revelou que, na condição de 50% da ETc, à variável AcSi apresentou forte correlação positiva com MSPA ($r = 0,78$), MSF ($r = 0,70$), SPAD ($r = 0,60$), e Área foliar (AF) ($r = 0,59$). Por outro lado, o NFV ($r = 0,46$), MSC ($r = 0,41$) e A ($r = 0,36$) exibiram correlações positivas moderadas com AcSi. Sob a condição de maior déficit hídrico (20% da ETc), as correlações positivas mais fortes foram observadas entre AcSi e MSC ($r =$

0,80), AcSi e MSPA ($r = 0,79$), AcSi e A ($r = 0,79$), AcSi e CRA ($r = 0,71$), AcSi e EUA ($r = 0,69$), AcSi e MSF ($r = 0,66$), AcSi e E ($r = 0,64$), AcSi e Ψ_w ($r = 0,57$). Correlações moderadas foram encontradas entre AcSi e NFV ($r = 0,49$), AcSi e Gs ($r = 0,47$) e AcSi e SPAD ($r = 0,36$).

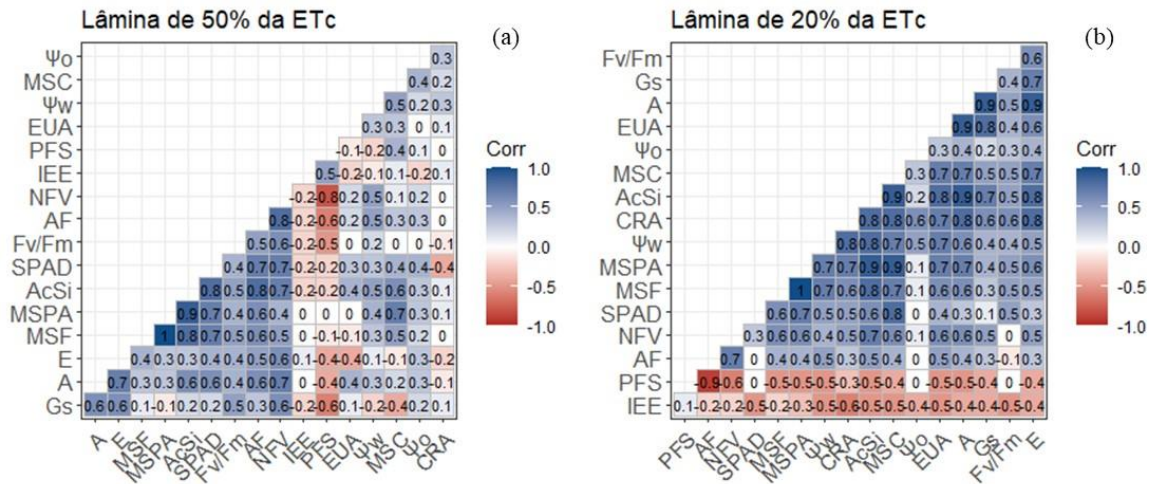


Figura 13. Matriz de correlação de Pearson entre características fisiológicas e morfológicas em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 % ETc) (a) e (20 % ETc) (b), sob quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha⁻¹). AcSi = acúmulo de silício; CRA= conteúdo relativo de água; Ψ_w = potencial hídrico foliar; Ψ_o = potencial osmótico; IEE = índice extravasamento de eletrólitos; Fv/Fm = eficiência quântica do fotossistema II; SPAD = Índice de SPAD; MSF = massa seca das folhas; MSC = massa seca dos colmos; MSPA = massa seca da parte aérea; AF= Área foliar; NFV = Número de folhas verdes; PFS = porcentagem de folhas secas; A = Fotossíntese líquida; Gs = condutância estomática; EUA = Eficiência do uso da água; E = taxa de transpiração. As correlações positivas foram destacadas em azul, as correlações negativas foram representadas em vermelho e as correlações próximas de zero em branco/cinza claro; maior tonalidade da cor indica a força da correlação.

4. DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo indicaram que as doses ótimas de 105,0 e 81,3 kg ha⁻¹ de Si proporcionaram maiores acúmulos de Si nas folhas em comparação aos colmos, sob a condição hídrica de 50% da ETc (Figura 5a, b). A alta absorção de Si com essas doses ótimas é atribuída à fonte utilizada, à condição de ETc e à forma de aplicação. Esses benefícios são corroborados por estudos anteriores, que demonstram que a aplicação de doses de Si no solo promove maiores concentrações desse elemento nas folhas de cana-de-açúcar em comparação aos colmos (OLIVA et al., 2021; CAMARGO e KEEPING, 2021a; CAMARGO et al., 2023c; COSTA et

al., 2023). Esses resultados sugerem que as folhas atuam como um reservatório crucial de Si, essencial para a proteção e eficiência fisiológica da planta.

Os elevados acúmulos de Si pela cana-de-açúcar encontrados neste estudo destacam a excelente capacidade dessa cultura em absorver o Si, o que pode ser atribuído a vários mecanismos fisiológicos e estruturais. Semelhante a outras espécies da família Poaceae, que possuem transportadores especializados nas membranas dos tecidos radiculares para a absorção e transporte ativo de Si, a cana-de-açúcar também demonstra capacidade de absorção ativa de Si (MITANI-UENO e MA, 2021; TEIXEIRA et al., 2022). Resultados que são consistentes com os achados de estudos com a espécie (OLIVA et al., 2021; CAMARGO et al., 2023c; CAMARGO et al., 2023d). Sendo assim, fica evidente que a aplicação de Si via solo, aumenta a concentração de Si na solução do solo, e como resultado, aumenta a biodisponibilidade do elemento para a planta (KATZ et al., 2021; CHERAGHI et al., 2024).

A primeira hipótese pode ser aceita, indicando que a disponibilidade de água e a aplicação de Si na forma de sílica amorfa via solo no plantio da cana-de-açúcar resultam em alta absorção de Si, com efeitos benéficos observados até 150 dias de cultivo. Este achado possui importantes implicações práticas, sugerindo um aumento no uso do Si em cultivos irrigados de cana-de-açúcar, especialmente com o uso de sílica amorfa, com uma dose baixa de Si (81,3 kg ha⁻¹). A eficácia do fertilizante de sílica amorfa em disponibilizar Si disponível foi comprovada em experimentos de campo com cana-de-açúcar (OLIVA et al., 2020; OLIVA et al., 2021).

Nesse estudo, observou-se que a condição de maior déficit hídrico (20% da ETc) limitou o crescimento da variedade RB041443, resultando em reduções na altura do colmo (Figura 6a), diâmetro do colmo (Figura 6c), número de perfilhos (Figura 6g), massa seca das folhas (Figura 7a) e da parte aérea (Figura 7d), além de aumentar o percentual de folhas secas (Figura 6e). No entanto, os danos causados pelo déficit hídrico nas plantas de cana-de-açúcar foram mitigados pelo uso de Si, através de mecanismos fisiológicos discutidos neste estudo, como o aumento do conteúdo de água (Figura 8a), potencial hídrico (Figura 8b) e ajustamento osmótico (Figura 8e).

Esses mecanismos favoreceram o crescimento das plantas, resultando em aumento na altura dos colmos (Figura 6b), redução da senescência foliar (percentual de folhas secas) (Figura 6f), aumento no número de folhas verdes (Figura 6d) e, conseqüentemente, aumento da área foliar (Figura 6h). Esses benefícios culminaram em maior produção de massa seca das folhas (Figura 7b), dos colmos (Figura 7c) e da parte aérea (Figura 7e). Em condições de estresse hídrico, a preservação de uma área foliar verde, conhecida como fenótipo 'permanecer verde', é fundamental para manter o potencial de rendimento da cultura (THOMAS; HOWARTH,

2000; BLUM, 2005). Os resultados obtidos corroboram aos achados anteriores em cana-de-açúcar (BEZERRA et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2020; TEIXEIRA et al., 2022), reforçando que o uso de Si tem um efeito benéfico na atenuação dos danos causados pelo déficit hídrico, até a fase de alongamento dos colmos.

É importante ressaltar que neste estudo os benefícios do Si na melhoria da tolerância das plantas ao estresse hídrico foi observado entre 60 e 150 DAP, durante o que é caracterizada como fase II (60 - 150 dias), que compreende o perfilhamento e o alongamento do colmo. Estágio de crescimento da cultura que é caracterizado por ser uma fase em que o estresse por déficit hídrico se torna um grande problema por causar menor crescimento da parte aérea e reduzir a produtividade em cana-de-açúcar (RAMESH, 2000; DEVI et al., 2019; HOANG; HIROO; YOSHINOBU, 2019; QIN et al., 2023).

As plantas submetidas à condição de 20% da ETc, sem adição de Si (0,0 kg ha⁻¹ controle), foram evidentemente mais afetadas pelo estresse hídrico do que as plantas na condição de 50% da ETc, resultando em um menor conteúdo relativo de água (Figura 8a). No entanto, a suplementação com Si reverteu os danos causados pelo déficit hídrico, preservando a hidratação dos tecidos vegetais, como demonstrado pelo ajuste do potencial hídrico foliar (Figura 8b). Esse resultado pode ser atribuído à deposição de Si, que, ao ser absorvido pelas plantas, é depositado na cutícula e nas células-guarda, formando uma camada de sílica que reduz a perda de água durante a transpiração (VANDEGEER et al., 2021; CHERAGHI et al., 2024). Além disso, o Si pode aumentar a absorção de água pelas plantas em condição de déficit hídrico, através do estímulo da expressão gênica das aquaporinas (AQPs) do tipo PIPs, proteínas de membrana especializadas na absorção de água pelas plantas (CHEN et al., 2016). Para tanto, apenas uma pequena quantidade do Si, presente na forma solúvel de ácido monossilício, é suficiente para desencadear esse efeito (KATZ, 2014).

O potencial hídrico foliar mais alto (menos negativo) na condição de 50% da ETc, em comparação com 20% da ETc, conforme mostrado nos resultados deste estudo (Figura 8b), contribuiu para a manutenção do turgor das células-guarda, mantendo os estômatos abertos. Este resultado já foi relatado em estudos anteriores com arroz (MING et al., 2012), cana-de-açúcar e cana-energia (TEIXEIRA et al., 2022) sob condições de déficit hídrico, corroborando aos resultados encontrados neste estudo.

Os resultados referentes ao potencial osmótico neste estudo, mostraram que a aplicação de Si diminuiu o potencial osmótico (Figura 8d), destacando o benéfico desse elemento para essa variável. Um potencial osmótico mais negativo (menor) pode indicar uma maior capacidade da planta de absorver água do solo. Esse efeito foi fundamental para a manutenção

do conteúdo relativo de água nas folhas das plantas na maior condição de estresse (20% da ETc) (Figura 8a). Esses resultados corroboram com achados recentes que também evidenciam os efeitos do Si na melhoria da manutenção do conteúdo relativo de água em cana-de-açúcar sob condições de estresse hídrico (TEIXEIRA et al., 2022).

O maior ajustamento osmótico (AO) alcançado com a dose de 78,0 kg ha⁻¹ de Si (Figura 8e) neste estudo, provavelmente ocorreu devido ao aumento do potencial osmótico nas folhas (Figura 8d). Visto que, um aumento no potencial osmótico nas folhas pode levar a uma maior capacidade das células de reter água e proteger as folhas da desidratação. Subbarão et al. (2000) relataram que as plantas podem obter maior rendimento em termos de crescimento, fotossíntese através do AO.

Ocorreu maior extravasamento de eletrólitos em plantas submetidas ao déficit hídrico severo (20% da ETc) no tratamento controle (0,0 kg ha⁻¹ de Si) (Figura 8f), indicando que houve degradação celular. No entanto, os resultados desse estudo mostraram que as doses ótimas de Si 107,5, e 113,8,0 kg ha⁻¹, proporcionaram reduções no extravasamento de eletrólitos nas condições hídricas de 50 e 20% da ETc (Figura 8f). Desta forma, fica evidente que a nutrição com Si minimizou os danos gerados a membrana celular pelo estresse hídrico, promovendo menor degradação da sua integridade. Esses resultados são consistentes com achados anteriores em cana-de-açúcar sob condição de déficit hídrico, em que também foi observado uma diminuição da taxa de extravasamento de eletrólitos com a aplicação de Si (BEZERRA et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2022).

Este estudo demonstrou que a aplicação da dose de 86,5 kg ha⁻¹ de Si aumentou o valor estimado de clorofila (índice SPAD) (Figura 10b). A elevação nos valores do índice SPAD promovida pela fertilização com Si foi observada em cultivares de cana-de-açúcar sob condições de déficit hídrico (DE CAMARGO et al., 2019) e sorgo (AHMED et al., 2011). Nesse contexto, o índice SPAD tem sido amplamente utilizado como um critério indireto para avaliar a tolerância à seca em diferentes genótipos e cultivares de cana-de-açúcar (SILVA et al., 2007). Assim, os resultados deste estudo indicam que o Si contribuiu para a melhora da tolerância à seca da variedade RB041443 em condições de déficit hídrico, promovendo um aumento nos níveis de clorofila.

Na fluorescência da clorofila *a* (Figura 9a, b, d, f), as aplicações de doses ótimas de Si foram essenciais para aumentarem a Fm, Fv e Fv/Fm (Figura 9c, e, g) nas plantas. A Fv/Fm tem sido amplamente utilizada como um indicador de estresse hídrico em estudos recentes (VERMA et al., 2020). Os valores máximos de Fv/Fm (Figura 9g) observados nesse estudo com a aplicação da dose máxima de 83,3 kg ha⁻¹ de Si pode ser atribuído tanto ao Si como

também ao aumento na concentração de pigmentos fotossintéticos, como: índice de SPAD (Figura 10a), clorofila *a* (Figura 10c), clorofila *b* (Figura 10d), clorofila total (Figura 10e) e carotenoides (Figura 10f), que associados contribuíram para a manutenção da atividade fotossintética das plantas prevenindo a exposição dos cloroplastos a níveis elevados de excitação energia (TEIXEIRA et al., 2022), minimizando a formação excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs) (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005) que tende a degradar os pigmentos fotossintéticos (FRAZÃO et al., 2020).

Um aumento da F_v/F_m promovido pela suplementação com Si, comprova que uma parcela significativa da radiação solar estava sendo eficientemente utilizada na fase fotoquímica da fotossíntese, sem prejuízo para os centros de reação do fotossistema II (SILVA et al., 2012; VERMA et al., 2021e; TEIXEIRA et al., 2022).

A aplicação de Si sob condições de estresse hídrico aumentou tanto a condutância estomática (Figura 11b) quanto a taxa de transpiração das folhas (Figura 11f) em plantas de cana-de-açúcar. Esses achados estão em concordância com estudos anteriores que relataram aumentos na condutância estomática (CAMARGO et al., 2023d) e na taxa de transpiração (CAMARGO et al., 2021b; VERMA et al., 2021f) em cana-de-açúcar. O aumento na taxa de transpiração pelo Si pode ser explicado pelo efeito do Si nos processos fisiológicos e bioquímicos dentro das células vegetais. Sob estresse hídrico, o Si é depositado ao redor das células-guarda e de suas paredes celulares, na forma sílica amorfa hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) impedindo o fechamento completo dos estômatos e permitindo que a condutância estomática (Figura 11b) e a transpiração (Figura 11f) ocorra normalmente (PRYCHID; RUDALL; GREGORY, 2003; LIANG et al., 2008; VANDEGEER et al., 2021; CHERAGHI et al., 2024).

Além disso, o aumento na condutância estomática e na transpiração também pode ser explicado pelo papel do Si em elevar o potencial hídrico das folhas, o que sustenta a transpiração estomática das plantas (MA; MIYAKE; TAKAHASHI, 2001; MVONDO-SHE e MARAIS, 2019). Esse efeito foi observado no presente estudo, conforme evidenciado pelo potencial hídrico (Figura 8b).

A aplicação de sílica amorfa como fonte de Si no solo beneficiou significativamente a fotossíntese líquida (A) (Figura 11a) e a eficiência do uso da água (EUA) (Figura 12a) em plantas de cana-de-açúcar, tanto em condições de déficit hídrico moderado (50% da ET_c) quanto severo (20% da ET_c). Notavelmente, o Si promoveu uma maior eficiência do uso da água na condição de 20% da ET_c , mostrando uma correlação positiva ($r = 0,69$) com o acúmulo de Si na planta (Figura 13b). Esses resultados corroboram achados recentes que também

demonstraram aumentos na EUA em plantas de cana-de-açúcar sob estresse hídrico e nutridas com Si (TEIXEIRA et al., 2022; XAVIER et al., 2024).

A elevada EUA é um atributo fisiológico crucial, especialmente em condições de escassez de água, uma vez que é considerado um mecanismo essencial para melhorar a produtividade das culturas e garantir a sobrevivência das plantas em ambientes com disponibilidade limitada de água (CENTRITTO et al., 2009; GILBERT; ZWIENIECKI; HOLBROOK, 2011; XAVIER et al., 2024). Portanto, a aplicação de Si na forma de sílica amorfa não apenas favorece a fotossíntese líquida, mas também aprimora a eficiência do uso da água, contribuindo para a resiliência da cana-de-açúcar em cenários de estresse hídrico.

O aumento na fotossíntese líquida após a aplicação de Si pode ocorrer devido a um aumento no conteúdo de clorofila (MA et al., 2002; JEER et al., 2021). Este resultado foi observado neste estudo com o aumento no índice SPAD (Figura 10b) e em estudos recentes em que o Si favoreceu a fotossíntese líquida na cultura da cana-de-açúcar sob condições de déficit hídrico (BOKHTIAR et al., 2012; VERMA et al., 2020; VERMA et al., 2021f; CAMARGO et al., 2023d).

As plantas tratadas com Si neste estudo aumentaram a concentração interna de CO₂ (Figura 11d) e eficiência instantânea de carboxilação (Figura 12c). Esses resultados foram atribuídos aos aumentos observados na condutância estomática (Gs) e na taxa de transpiração (E) das plantas que receberam a aplicação de Si. Esses achados são consistentes com resultados de estudos anteriores em que foram encontrados aumento da concentração interna de CO₂ e na eficiência instantânea de carboxilação em plantas que foram nutridas com Si sob déficit hídrico (TEIXEIRA et al., 2022).

A segunda hipótese deste estudo foi confirmada, indicando que a aplicação de Si via solo durante a fase inicial de formação dos colmos proporciona um efeito benéfico que atenua os danos causados pelo déficit hídrico. Este benefício foi atribuído ao mecanismo induzido pelo Si, que promove mudanças em parâmetros fisiológicos, favorecendo a manutenção da hidratação celular. Esse processo está associado ao ajuste osmótico, o que reduz o estresse causado pelo déficit hídrico e, conseqüentemente, favorece o acúmulo de biomassa nas plantas.

Este estudo propõe pela primeira vez que o Si na forma de sílica amorfa, aplicado em doses relativamente baixas de Si durante as fases críticas de desenvolvimento da cana-de-açúcar: perfilhamento e alongamento dos colmos, alivia os danos causados pelo déficit hídrico na cultura por um período prolongado. Essa prática se mostra eficaz para um uso mais sustentável da água, promovendo maior produção de biomassa com menor consumo hídrico durante o período crítico de estabelecimento da cultura.

5. CONCLUSÕES

Em condições de déficit hídrico severo, a aplicação de 89,5 kg ha⁻¹ de Si aumenta a produção de massa seca dos colmos, correlacionando-se diretamente com o acúmulo de Si na parte aérea das plantas.

A aplicação de Si via solo, na forma de sílica amorfa, melhora a tolerância da cana-de-açúcar ao estresse hídrico severo. Essa melhoria foi evidente no aumento do conteúdo relativo de água e no potencial hídrico foliar, os quais influenciaram positivamente as trocas gasosas foliares.

Essas descobertas sugerem o potencial do fertilizante à base de sílica amorfa em melhorar a eficiência da irrigação na cana-de-açúcar. No entanto, investigações adicionais são necessárias para explorar os mecanismos moleculares pelos quais o Si confere tolerância ao estresse hídrico, incluindo a análise de genes e proteínas envolvidos na resposta ao estresse e na regulação da homeostase hídrica.

6. REFERÊNCIAS

AHMED, M. et al. Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, n. 3, p. 594-607, 2011. <https://doi.org/10.5897/AJAR10.62>

ANA (2021) **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada (2ª)**. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Disponível em: <
https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/a874e62f27544c6a986da170_2a911c6b>. Acesso em 10 de março de 2024.

BADAL, E. et al. Moderate plant water stress reduces fruit drop of “Rojo Brillante” persimmon (*Diospyros kaki*) in a Mediterranean climate. **Agricultural water management**, v. 119, p. 154-160, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.12.020>

BARRS, H. D.; WEATHERLEY, P. E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. **Australian journal of biological sciences**, v. 15, p. 413-428, 1962. <https://doi.org/10.1071/BI9620413>

BEZERRA, B. K. L. et al. Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 41, n. 12, p. 189, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>

BLUM, A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive?. **Australian journal of agricultural research**, v. 56, n. 11, p. 1159-1168, 2005. <https://doi.org/10.1071/AR05069>

BLUM, A. Osmotic adjustment and growth of barley genotypes under drought stress. **Crop Science**, v.29, n. 1, p. 230-233, 1989. <https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900010052x>

BOKHTIAR, S. M. et al. 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, n. 8, p. 1255-1275, 2012. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.676379>

CAMARGO, M. S. et al. Correction to: Silicon Fertilization in Sugarcane Drought-Contrasting Cultivars Subjected to Water Deficit at the Ripening Phase. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 3, p. 4716–4716, 2023c. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01303-6>

CAMARGO, M. S. et al. Silicon Fertilization Enhances Photosynthetic Activity and Sugar Metabolism in Sugarcane Cultivars under Water Deficit at the Ripening Phase. **Silicon**, v. 15, n. 7, p. 3021–3033, 2023d. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-02236-y>

CAMARGO, M. S. et al. 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**, v. 466, p. 581-595, 2021b. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05063-z>

CAMARGO, M. S., KEEPING, M. G. Silicon in Sugarcane: Availability in Soil, Fertilization, and Uptake. **Silicon**, v. 13, n. 10, p. 3691–3701, 2021a. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00935-y>

CENTRITTO, M. et al. Leaf gas exchange, carbon isotope discrimination, and grain yield in contrasting rice genotypes subjected to water deficits during the reproductive stage. **Journal of experimental botany**, v. 60, n. 8, p. 2325-2339, 2009. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp123>

CHAI, Q. et al. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 36, p. 1-21, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0338-6>

CHEN, D. et al. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific reports**, v. 6, n. 1, p. 22882, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep22882>

CHERAGHI, M. et al. Application of silicon improves rhizosheath formation, morpho-physiological and biochemical responses of wheat under drought stress. **Plant and Soil**, p. 1-19, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06584-z>

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. 1, p. 51, 2023. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04077-2>

DE CAMARGO, M. S. et al. Silicon Fertilization Improves Physiological Responses in Sugarcane Cultivars Grown Under Water Deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, n. 1, p. 81–91, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>

DE WRACHIEN, D.; SCHULTZ, B.; GOLI, M. B. Impacts of population growth and climate change on food production and irrigation and drainage needs: A world-wide view. **Irrigation and Drainage**, v. 70, n. 5, p. 981-995, 2021. <https://doi.org/10.1002/ird.2597>

DEBONA, D.; RODRIGUES, F. A.; DATNOFF, L. E. Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. **Annual Review of Phytopathology**, v. 55, p. 85-107, 2017. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035312>

DEVI, K. et al. Gene expression profiling in sugarcane genotypes during drought stress and rehydration. **Sugar Tech**, v. 21, p. 717-733, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0687-y>

DINGRE, S. K.; GORANTIWAR, S. D.; KADAM, S. A. Correlating the field water balance derived crop coefficient (Kc) and canopy reflectance-based NDVI for irrigated sugarcane. **Precision Agriculture**, v. 22, p. 1134-1153, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09774-8>

DIONISIO-SESE, M. L.; TOBITA, S. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. *Plant science*, v. 135, n. 1, p. 1-9, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00025-9)

EMBRAPA - **EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA**. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. (5ª ed), revisada e ampliada. Brasília, DF, Embrapa Solos, 2018, p. 117.

FAO (2021) **The agricultural production indices**. In: Food Agric. Organ. United Nations. Disponível em <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em 22 março de 2024.

FERREIRA, T. H. S. et al. Sugarcane Water Stress Tolerance Mechanisms and Its Implications on Developing Biotechnology Solutions. *Frontiers in Plant Science*, v. 8, p. 1077, 23, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01077>

FRAZÃO, J. J. et al. Silicon changes C:N:P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 12492, 27, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69310-6>

GILBERT, M. E.; ZWIENIECKI, M. A.; HOLBROOK, N. M. Independent variation in photosynthetic capacity and stomatal conductance leads to differences in intrinsic water use efficiency in 11 soybean genotypes before and during mild drought. *Journal of Experimental Botany*, v. 62, n. 8, p. 2875-2887, 2011. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq461>

GONG, H.; CHEN, K. The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, v. 34, p. 1589-1594, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-0954-6>

GONZALEZ-PORRAS, C. V. et al. Silicon via fertigation with and without potassium application, improve physiological aspects of common beans cultivated under three water regimes in field. *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, p. 2051, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52503-8>

HE, S. et al. Economic evaluation of water-saving irrigation practices for sustainable sugarcane production in Guangxi Province, China. *Sugar Tech*, p. 1-7, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-00965-9>

HERMANN, E. R.; CÂMARA, G. M. D. S. **Um método para estimar a área foliar da cana-de-açúcar**. STAB-Açúcar e Álcool e Subprodutos, v. 17, n. 5, p. 32-34, 1999. Acesso em: 18 mar. 2024.

HILLEL, D. **Soil in the Environment: Crucible of Terrestrial Life**. 1 ed., Burlington, MA: Elsevier Academic Press, 2007. 320p

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, n. 2, p. 250-261, 2019. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2018.1540277>

IBRAHIM, A. E. et al. Exogenously applied proline enhances morph-physiological responses and yield of drought-stressed maize plants grown under different irrigation systems. *Frontiers in Plant Science*, v. 13, p. 897027, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.897027>

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field crops research*, v. 92, n. 2-3, p. 185-202, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.023>

JEER, M. et al. Exogenous application of different silicon sources and potassium reduces pink stem borer damage and improves photosynthesis, yield and related parameters in wheat. *Silicon*, v. 13, n. 3, p. 901-910, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00481-7>

JOHNSON, S. N. et al. Field application of silicon alleviates drought stress and improves water use efficiency in wheat. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1030620, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1030620>

KATZ, O. Beyond grasses: the potential benefits of studying silicon accumulation in non-grass species. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 89621, 2014. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00376>

KATZ, O. et al. Silicon in the Soil–Plant Continuum: Intricate Feedback Mechanisms within Ecosystems. **Plants**, v. 10, n. 4, p. 652, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10040652>

KIRKHAM, M. B. **Principles of soil and plant water relations**. 2 ed, Elsevier: Academic Press, 2014, 580p.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. **Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods**, v. 5, p. 635-662, 1986. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício no solo, planta e fertilizantes**. (UFU, 2004).

KRASKA, J. E.; BREITENBECK, G. A. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 41, n. 17, p. 2075-2085, 2010. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>

LEGHARI, S. J. et al. Effect of NPK rates and irrigation frequencies on the growth and yield performance of *Trifolium alexandrinum* L. **AIMS Agriculture & Food**, v. 3, n. 4, 2018. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2018.4.397>

LIANG, Y. et al. Role of silicon in enhancing resistance to freezing stress in two contrasting winter wheat cultivars. **Environmental and Experimental Botany**, v. 64, n. 3, p. 286-294, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.06.005>

LICHTENTHALER, H. K. [34] Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In: **Methods in enzymology**. Academic Press, 1987. p. 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)

LICHTENTHALER, H. K.; BUSCHMANN, C.; KNAPP, M. How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio R_{Fd} of leaves with the PAM fluorometer. **Photosynthetica**, v. 43, p. 379-393, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11099-005-0062-6>

MA, J. F. et al. A rice mutant defective in Si uptake. **Plant physiology**, v. 130, n. 4, p. 2111-2117, 2002. <https://doi.org/10.1104/pp.010348>

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants. **Studies in plant Science**, v. 8, p. 17-39, 2001. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697592>

MACHADO, R. S. et al. Biometric and physiological responses to water deficit in sugarcane at different phenological stages. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 1575-1582, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001200003>

MARCHIN, R. M. et al. A simple method for simulating drought effects on plants. **Frontiers in plant science**, v. 10, p. 493655, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01715>

MEDEIROS, D. B. et al. Physiological limitations in two sugarcane varieties under water suppression and after recovering. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 25, p. 213-222, 2013.

MERRIAM, J. L., KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Utah State University, 1978. <https://agris.fao.org/agrissearch/search.do?recordID=XF2016027644>

MING, D. F. et al. Silicon alleviates PEG-induced water-deficit stress in upland rice seedlings by enhancing osmotic adjustment. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 198, n. 1, p. 14-26, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00486.x>

MITANI-UENO, N.; MA, J. F. Linking transport system of silicon with its accumulation in different plant species. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 67, n. 1, p. 10-17, 2021. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1845972>

MVONDO-SHE, M. A.; MARAIS, D. The investigation of silicon localization and accumulation in citrus. **Plants**, v. 8, n. 7, p. 200, 2019. <https://doi.org/10.3390/plants8070200>

NAUMANN, G. et al. Global changes in drought conditions under different levels of warming. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 7, p. 3285-3296, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017GL076521>

OLIVA, K. M. E. et al. Amorphous Silica-Based Fertilizer Increases Stalks and Sugar Yield and Resistance to Stalk Borer in Sugarcane Grown Under Field Conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 3, p. 2518–2529, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00543-8>

OLIVA, K. M. E. et al. Biomass and concentration of nutrients and silicon in sugarcane grown on soil fertilized with diatomite. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 4, p. 1-7, 2020. <https://doi.org/10.5039/agraria.v15i4a8755>

PARKASH, V.; SINGH, S. A review on potential plant-based water stress indicators for vegetable crops. **Sustainability**, v. 12, n. 10, p. 3945, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12103945>

PRYCHID, C. J.; RUDALL, P. J.; GREGORY, M. Systematics and biology of silica bodies in monocotyledons. **The botanical review**, v. 69, n. 4, p. 377-440, 2003. [https://doi.org/10.1663/0006-8101\(2004\)069\[0377:SABOSB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0006-8101(2004)069[0377:SABOSB]2.0.CO;2)

QIN, N. et al. Assessing the drought impact on sugarcane yield based on crop water requirements and standardized precipitation evapotranspiration index. **Agricultural Water Management**, v. 275, p. 108037, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108037>

RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 185, n. 2, p. 83-89, 2000. <https://doi.org/j.1439-037x.2000.00404.x>

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2022.

SANDERS, G. J.; ARNDT, S. K. Osmotic adjustment under drought conditions. In: **Plant responses to drought stress: From morphological to molecular features**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 199-229. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_8

SILVA, J. L. F. D. et al. New strategy for silicon supply through fertigation in sugarcane integrating the pre-sprouted seedling phase and field cultivation. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 1230, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27323-3>

SILVA, M. D. A. et al. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, p. 193-201, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000300003>

SILVA, O. N. et al. Silicon-induced increase in chlorophyll is modulated by the leaf water potential in two water-deficient tomato cultivars. **Plant Soil Environ**, v. 58, n. 11, p. 481-486, 2012. <https://doi.org/10.17221/213/2012-PSE>

SILVA, W. R. et al. Assessing human health risks and strategies for phytoremediation in soils contaminated with As, Cd, Pb, and Zn by slag disposal. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 144, p. 522-530, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.068>

SONG, X. et al. Detection of photosynthetic performance of *Stipa bungeana* seedlings under climatic change using chlorophyll fluorescence imaging. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 165620, 2016. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01254>

SOUZA, E. R. et al. Biomass, anatomical changes and osmotic potential in *Atriplex nummularia* Lindl. cultivated in sodic saline soil under water stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 82, p. 20-27, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.03.007>

SUBBARAO, G. V. et al. Osmotic adjustment, water relations and carbohydrate remobilization in pigeonpea under water deficits. **Journal of plant physiology**, v. 157, n. 6, p. 651-659, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(00\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(00)80008-5)

TEIXEIRA, G. C. M. et al. Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 17487, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21680-9>

TEIXEIRA, G. C. M. et al. Silicon in Pre-sprouted Sugarcane Seedlings Mitigates the Effects of Water Deficit After Transplanting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 3, p. 849–859, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00170->

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise do solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017, 573 p

THOMAS, H.; HOWARTH, C. J. Five ways to stay green. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. suppl_1, p. 329–337, 1 fev. 2000. https://doi.org/10.1093/jexbot/51.suppl_1.329

TUBAÑA, B. S., HECKMAN, J. R. Silicon in soils and plants. **Silicon and plant diseases**, p. 7-51, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22930-0_2

TURNER, N. C. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. **Plant and soil**, v. 58, n. 1-3, p. 339-366, 1981. <https://doi.org/10.1007/BF02180062>

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

VANDEGEER, R. K. et al. Silicon deposition on guard cells increases stomatal sensitivity as mediated by K⁺ efflux and consequently reduces stomatal conductance. **Physiologia Plantarum**, v. 171, n. 3, p. 358-370, 2021. <https://doi.org/10.1111/ppl.13202>

VERMA, K. K. et al. Foliar application of silicon boosts growth, photosynthetic leaf gas exchange, antioxidative response and resistance to limited water irrigation in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 582 - 592, 2021e. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.032>

VERMA, K. K. et al. Functional relationship between photosynthetic leaf gas exchange in response to silicon application and water stress mitigation in sugarcane. **Biological Research**, v. 54, n. 1, p. 15, 2021f <https://doi.org/10.1186/s40659-021-00338-2>

VERMA, K. K. et al. The Impact of Silicon on Photosynthetic and Biochemical Responses of Sugarcane under Different Soil Moisture Levels. **Silicon**, v. 12, n. 6, p. 1355–1367, 2020.
<https://doi.org/10.1007/s12633-019-00228-z>

WAKCHAURE, G. C. et al. Growth, bulb yield, water productivity and quality of onion (*Allium cepa* L.) as affected by deficit irrigation regimes and exogenous application of plant bio-regulators. **Agricultural Water Management**, v. 199, p. 1-10, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.11.026>

XAVIER, M. F. N. et al. CO₂ emission and physiological aspects of sugarcane ratoon as interactive functions of nitrogen and silicon applications. **Journal of Plant Nutrition**, p. 1–14, 2024.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2325956>

YANG, M. D.; LEGHARI, S. J.; GUAN, X. K. Deficit subsurface drip irrigation improves water use efficiency and stabilizes yield by enhancing subsoil water extraction in winter wheat. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 499754, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00508>

ZANÃO JÚNIOR, L. A. et al. Rice grown in nutrient solution with doses of manganese and silicon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1629-1639, 2010.
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000500016>

CAPÍTULO III

**HOMEOSTASE ESTEQUIOMÉTRICA E ESTADO NUTRICIONAL EM
CANA-DE-AÇÚCAR SOB DÉFICIT HÍDRICO E APLICAÇÃO DE SÍLICA AMORFA
BIOGÊNICA**

CAPÍTULO III: Homeostase estequiométrica e estado nutricional em cana-de-açúcar sob déficit hídrico e aplicação de sílica amorfa biogênica

RESUMO: As mudanças climáticas, especialmente o aumento da frequência de secas nas regiões tropicais, representam um desafio significativo para o cultivo da cana-de-açúcar. Essas condições de seca afetam o equilíbrio de carbono, nitrogênio e fósforo (C:N:P), provocando alterações bioquímicas e fisiológicas que reduzem a produtividade dessa cultura. A adubação com silício (Si) tem mostrado potencial para favorecer a homeostase desses nutrientes, resultando em maior produção de biomassa na cana-de-açúcar. Porém, faltam pesquisas sobre a melhor fonte e a dose ideal de aplicação. Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes doses de um fertilizante à base de sílica amorfa em modificar a estequiometria do C:N:P em cana-de-açúcar, visando aumentar a eficiência nutricional e, conseqüentemente, a produção de biomassa das plantas cultivadas sob condições de restrição hídrica. O experimento foi conduzido em ambiente protegido na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) (8°01'00.5"S 34°56'40.6"W a 4 m). Os tratamentos consistiram em dois níveis de irrigação (50% e 20% da evapotranspiração da cultura - ETc) e quatro doses de Si: 0,0 (testemunha), 78, 117 e 156 kg ha⁻¹ de Si, utilizando as doses respectivas de 0, 300, 450 e 600 kg ha⁻¹ de sílica amorfa (Agrisilica, Agripower, NSW, Austrália) (26% de Si disponível). As plantas de cana-de-açúcar absorveram Si em concentrações de 1,4% do peso seco nas folhas, enquanto nos colmos essas concentrações foram de 0,7% do peso seco, sob as condições de 50% e 20% da ETc. O fornecimento de doses ótimas de Si reduziu os teores de C, alterou as relações C:N:P e aumentou as eficiências de uso do C e N nas plantas de cana-de-açúcar sob condições de restrição hídrica. O estudo demonstra que o Si na forma de sílica amorfa melhora as relações hídricas das plantas, mantendo o potencial hídrico e promovendo o ajuste osmótico, o que contribui para uma maior tolerância da cana-de-açúcar ao déficit hídrico. A aplicação de 78,0 kg ha⁻¹ de Si, equivalente a 300,0 kg ha⁻¹ de sílica amorfa, mostrou-se eficaz em aumentar a eficiência de uso do C, proporcionando uma maior produção de massa seca dos colmos em condições de déficit hídrico moderado.

Palavras – chave: Silício (Si), restrição hídrica, eficiência nutricional, *Saccharum officinarum* L.

ABSTRACT: Climate change, especially the increased frequency of droughts in tropical regions, poses a significant challenge for sugarcane cultivation. These drought conditions affect the balance of carbon, nitrogen, and phosphorus (C:N:P), causing biochemical and physiological changes that reduce the productivity of this crop. Silicon (Si) fertilization has shown potential to favor the homeostasis of these nutrients, resulting in greater biomass production in sugarcane. However, there is a lack of research on the best source and the ideal application rate. This study aimed to evaluate the effect of different doses of an amorphous silica-based fertilizer in modifying the stoichiometry of C:N:P in sugarcane, aiming to increase the nutritional efficiency and, consequently, the biomass production of plants grown under water restriction conditions. The experiment was conducted in a protected environment at the Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) (8°01'00.5"S 34°56'40.6"W at 4 m). The treatments consisted of two irrigation levels (50% and 20% of crop evapotranspiration - ETc) and four Si rates: 0.0 (control), 78, 117 and 156 kg ha⁻¹ of Si, using the respective rates of 0, 300, 450 and 600 kg ha⁻¹ of amorphous silica (Agrisilica, Agripower, NSW, Australia) (26% of available Si). Sugarcane plants absorbed Si at concentrations of 1.4% of dry weight in leaves, while in stems these concentrations were 0.7% of dry weight, under the conditions of 50% and 20% of ETc. The supply of optimal Si doses reduced C contents, altered C:N:P ratios and increased C and N use efficiencies in sugarcane plants under water restriction conditions. The study demonstrates that Si in the form of amorphous silica improves plant water relations, maintaining water potential and promoting osmotic adjustment, which contributes to greater tolerance of sugarcane to water deficit. The application of 78.0 kg ha⁻¹ of Si, equivalent to 300.0 kg ha⁻¹ of amorphous silica, was effective in increasing C use efficiency, providing greater dry mass production of stalks under moderate water deficit conditions.

Keywords: Silicon (Si), water restriction, nutritional efficiency, *Saccharum officinarum* L.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), a principal cultura produtora de açúcar e bioenergia, desempenha um papel crucial na economia e na sustentabilidade agrícola de muitos países em regiões tropicais e subtropicais (CAMARGO et al., 2023; GARCIA et al., 2020). No entanto, as mudanças climáticas, particularmente o aumento da frequência de secas nessas regiões, têm representado um desafio significativo para o cultivo da cana-de-açúcar (BESHARAT; BARÃO; CRUZ, 2020).

Para alcançar altos rendimentos, a cana-de-açúcar exige uma demanda hídrica elevada, variando entre 1.500 e 2.500 mm anuais, dependendo das condições climáticas (FAO, 2021). Além disso, seu crescimento é sensível ao déficit hídrico (FERREIRA et al., 2017; LAKSHMANAN; ROBINSON, 2013), principalmente nas fases de perfilhamento e grande crescimento, devido ao crescimento intenso das plantas (CAMARGO et al., 2023; DE CAMARGO et al., 2019; DINH et al., 2017).

Os sistemas de produção agrícola enfrentam atualmente o desafio de manter altas taxas de produção com recursos cada vez mais limitados, especialmente em regiões onde a água se torna escassa (BESHARAT; BARÃO; CRUZ, 2020). A demanda por água para irrigação está projetada para aumentar em 11% até 2050, representando um desafio significativo para muitas regiões que já enfrentam restrições hídricas (DE WRACHIEN; SCHULTZ; GOLI, 2021). Esse cenário sublinha a necessidade urgente de novas abordagens que aumentem a viabilidade dos sistemas irrigados de cana-de-açúcar, melhorando a produção de colmos em áreas onde a irrigação é limitada devido à escassez de água (COSTA et al., 2023).

Nos últimos anos, diversos estudos foram realizados focando na fisiologia da cana-de-açúcar para entender e prever as respostas das plantas ao déficit hídrico (DE CAMARGO et al., 2019; BEZERRA et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2020). Recentemente, os estudos identificaram que o déficit hídrico também promove alterações no equilíbrio homeostático do carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P), reduzindo a massa seca das plantas (COSTA et al., 2023; DE OLIVEIRA FILHO et al., 2021a; TEIXEIRA et al., 2022). É importante destacar que a homeostase estequiométrica das razões C:N:P desempenha um papel fundamental na explicação e previsão das respostas das plantas a estresses induzidos pelo déficit hídrico (HARVEY; LEFFLER, 2020).

Dentre as medidas propostas para enfrentar os desafios futuros relacionados ao aumento do estresse hídrico, o uso do silício (Si) tem se destacado como uma estratégia de grande interesse na agricultura (SCHALLER et al., 2021). Estudos recentes demonstram que o Si pode

aumentar a eficiência no uso da água (GONZALEZ-PORRAS et al., 2024; IRFAN et al., 2023) e promover um equilíbrio estequiométrico adequado de C:N:P nos tecidos vegetais (DUTRA et al., 2023). Essas características tornam o Si uma abordagem promissora para uma agricultura irrigada sustentável (GONZALEZ-PORRAS et al., 2024).

Atualmente, as pesquisas sobre o uso do Si têm se concentrado na identificação de fontes que ofereçam maior disponibilidade de Si nos tecidos vegetais (KEEPING, 2017c; ASGARI et al., 2018). Estudos indicam que diversas fontes de Si podem fornecer este elemento para as plantas; contudo, a eficácia dessas fontes varia consideravelmente em termos de Si total e Si disponível para absorção pelas plantas (CRUSCIOL et al., 2014; KEEPING, 2017a; KEEPING; MILES; RUTHERFORD, 2017d). Para que uma fonte seja considerada eficiente, é necessário que ela demonstre uma correlação entre a disponibilidade de Si no solo e o teor de Si nas folhas (KATZ et al., 2021; DO NASCIMENTO et al., 2021).

O uso de fertilizantes à base de sílica amorfa natural pode aumentar a eficiência da fertilização, ao mesmo tempo em que reduz os riscos de contaminação nos agroecossistemas (OLIVA et al., 2021). A sílica biogênica, derivada do acúmulo de conchas fósseis de algas diatomáceas, é predominantemente composta de sílica amorfa, $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (SANDHYA e PRAKASH, 2019).

Estudos com a cultura da cana-de-açúcar demonstraram uma correlação entre o aumento da absorção, transporte e acúmulo de Si disponível nos tecidos foliares com a utilização da sílica amorfa (OLIVA et al., 2020; OLIVA et al., 2021; DO NASCIMENTO et al., 2021). O fornecimento exógeno de Si por meio dessa fonte melhorou a absorção de N e P, resultando em incrementos na biomassa e no colmo das plantas (OLIVA et al., 2020; OLIVA et al., 2021).

No entanto, ainda não há estudos que investiguem o uso da sílica amorfa em cana-de-açúcar sob diferentes condições de déficit hídrico. Portanto, este estudo é essencial para avaliar o potencial dessa fonte em fornecer Si disponível em duas condições hídricas e compreender como o Si contribui para a manutenção da homeostase nutricional e o aumento da eficiência nutricional na cana-de-açúcar.

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes doses de um fertilizante à base de sílica amorfa em modificar a estequiometria do C:N:P em cana-de-açúcar, visando aumentar a eficiência nutricional e, conseqüentemente, a produção de biomassa das plantas cultivadas sob duas condições de restrição hídrica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Condições de cultivo e material vegetal

O experimento foi realizado com a cultura da cana-de-açúcar em um ambiente protegido no Departamento de Agronomia, localizado no campus sede da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), em Recife, Pernambuco, Brasil ($8^{\circ}01'00.5''S$ $34^{\circ}56'40.6''W$ a 4 m), durante o período de maio a outubro de 2023. As temperaturas e a umidade relativa do ar, tanto máxima quanto mínima e média, foram monitoradas diariamente dentro da casa de vegetação, utilizando um termo-higrômetro digital (HTC-2A, Foco Instrumentos de Medição) (Figura 1).

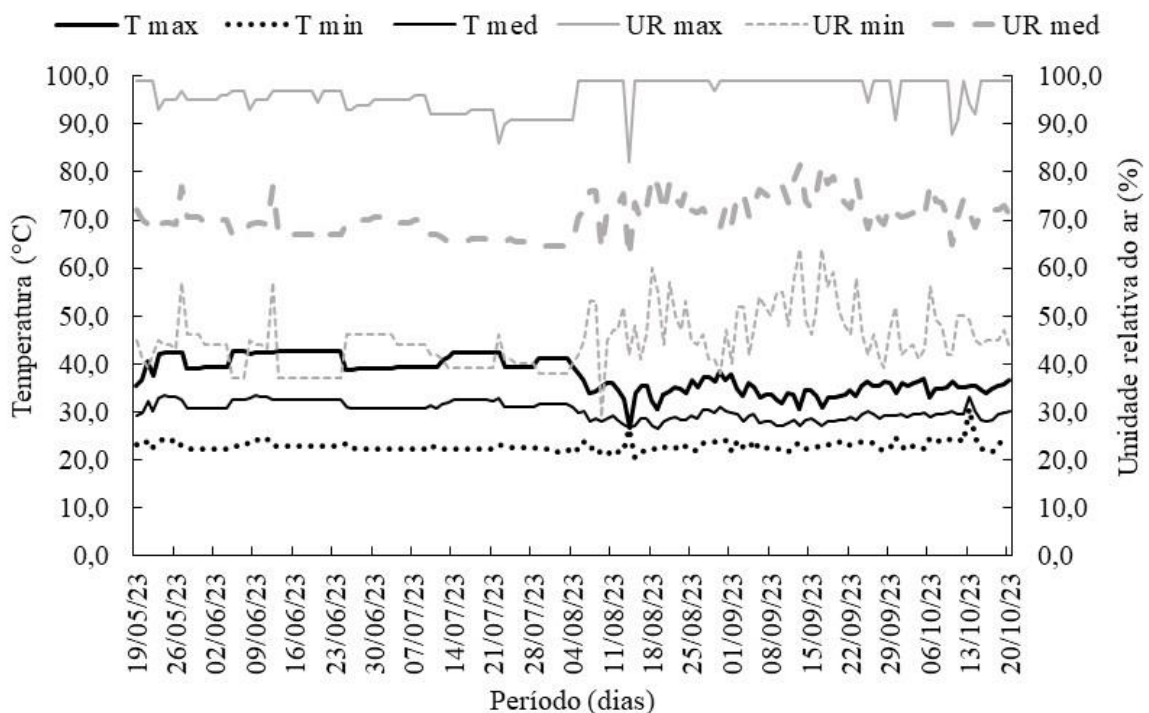


Figura 1. Temperatura máxima (T max), mínima (T min) e média (T med) e umidade relativa máxima (UR max), mínima (UR min) e média (UR med) do ar na casa de vegetação durante o período do experimento.

O solo utilizado no experimento foi coletado da camada superficial de 0 a 20 cm em uma área experimental anteriormente cultivada com cana-de-açúcar na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC), uma unidade vinculada à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). A estação está localizada no município de Carpina ($7^{\circ}51'07''S$, $35^{\circ}14'16''W$, a 180 m), na região da Zona da Mata do Estado de Pernambuco, no Nordeste do Brasil.

O solo utilizado no estudo foi classificado como Argissolo Amarelo Distrófico abrupto, com textura franco-argilo-arenosa, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018). Para a caracterização físico-hídrica e química do solo (Tabela 1), foram analisadas dez amostras de solo após o preparo da terra fina seca ao ar (TFSA). A análise granulométrica e a determinação da argila dispersa em água (ADA) foram realizadas pelo método do densímetro, enquanto a densidade do solo foi medida pelo método do torrão parafinado e a densidade de partículas pelo método do balão volumétrico (TEIXEIRA et al., 2017).

A partir da curva de retenção de água no solo (CRAS), foram determinadas a umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) de $0,29 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) de $0,11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, utilizando-se uma mesa de tensão para equilibrar as amostras em potenciais baixos (1, 6 e 10 kPa) e uma câmara de pressão de Richard (KLUTE; ARNOLD, 1986) para potenciais médios e altos (33, 300 e 1.500 kPa). O ajuste da curva foi realizado aplicando o modelo de Van Genuchten (1980).

As análises químicas do solo incluíram a determinação do pH em água, cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), alumínio trocável (Al^{3+}), acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}$) e fósforo disponível. O pH foi medido em uma suspensão de solo e água na proporção de 1:2,5 (solo: solução). Os cátions trocáveis Na^+ e K^+ , assim como o P disponível, foram extraídos utilizando Mehlich⁻¹ e determinados por fotometria de emissão de chama e colorimetria, respectivamente. Os cátions trocáveis Ca^{2+} e Mg^{2+} foram extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e quantificados por titulometria (TEIXEIRA et al., 2017). Os micronutrientes Cu, Mn, Zn e Fe foram extraídos também por Mehlich⁻¹ e analisados por espectrometria de emissão ótica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). O teor de Si disponível foi determinado pelo método do cloreto de cálcio (CaCl_2) a $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, conforme descrito por Korndörfer et al. (2004) (Tabela 1).

Tabela 1- Caracterização físico-química e hídrica do solo utilizado no experimento coletado na camada de 0-20 cm

Característica química	Valor	Característica físico – hídrica	Valor
pH (H_2O)	4,67	Areia (g kg^{-1})	704,95
$\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	6,30	Silte (g kg^{-1})	79,02
MO (g dm^{-3})	27,36	Argila (g kg^{-1})	216,03
P (mg dm^{-3})	6,90	Classe textural	Franco - argilo - arenosa

K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,20	ADA (%)	14,18
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	3,10	GF	33,94
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,20	Ds (g cm ⁻³)	1,70
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,03	Dp (g cm ⁻³)	2,52
SB ^a (cmol _c dm ⁻³)	3,50	Porosidade (%)	33,84
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,45	θ _{CC} (cm ⁻³ cm ⁻³)	0,29
CTC ^b efetiva (cmol _c dm ⁻³)	9,80	θ _{PMP} (cm ⁻³ cm ⁻³)	0,11
V ^c (%)	35,71		
Si CaCl ₂ (mg/dm ⁻³)	18,72		
Cu (mg/dm ⁻³)	0,28		
Mn (mg/dm ⁻³)	3,31		
Zn (mg/dm ⁻³)	1,64		
Fe (mg/dm ⁻³)	81,08		

- 1 ^a Soma de bases (SB = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺)
- 2 ^b Capacidade de troca catiônica (CTC = SB + H + Al)
- 3 ^c Saturação por base (V = SBx100/T)
- 4 MO: Matéria Orgânica
- 5 ADA: Argila dispersa em água
- 6 GF: Grau de floculação
- 7 Ds: Densidade do Solo
- 8 Dp: Densidade de partícula
- 9 θ_{CC}: Umidade na capacidade de campo
- 10 θ_{PMP}: Umidade no ponto de murcha permanente

Após a coleta do solo na área experimental da EECAC - UFRPE, o material foi seco ao ar, destorroado e peneirado em uma malha de 4 mm. Antes de encher os vasos, foi instalado um sistema de drenagem nos vasos para melhorar as condições de aeração e drenagem. Para isso, a base dos vasos foi perfurada com dois orifícios de aproximadamente 1 cm de diâmetro (Figura 2a). Em seguida, foi colocada uma camada de brita com 19 mm de espessura (Figura 2b), sobre a qual foi posicionada uma manta geotêxtil Bidim RT-08 (Figura 2c). Essa configuração teve como principal objetivo reter as partículas de solo da camada superior, evitando a obstrução do sistema de drenagem e assegurando um fluxo adequado de água. Em seguida, 90 kg de solo foram pesados, homogeneizados com 5,75 g dm³ de calcário dolomítico e colocados em vasos plásticos de 80 L. O solo foi incubado nos vasos por 30 dias, mantendo-se na capacidade de campo (θ_{cc}) para permitir as reações químicas do calcário. O corretivo foi aplicado com base em uma curva de incubação prévia, ajustando o pH de 4,7 para uma faixa entre 6,0 e 6,5.

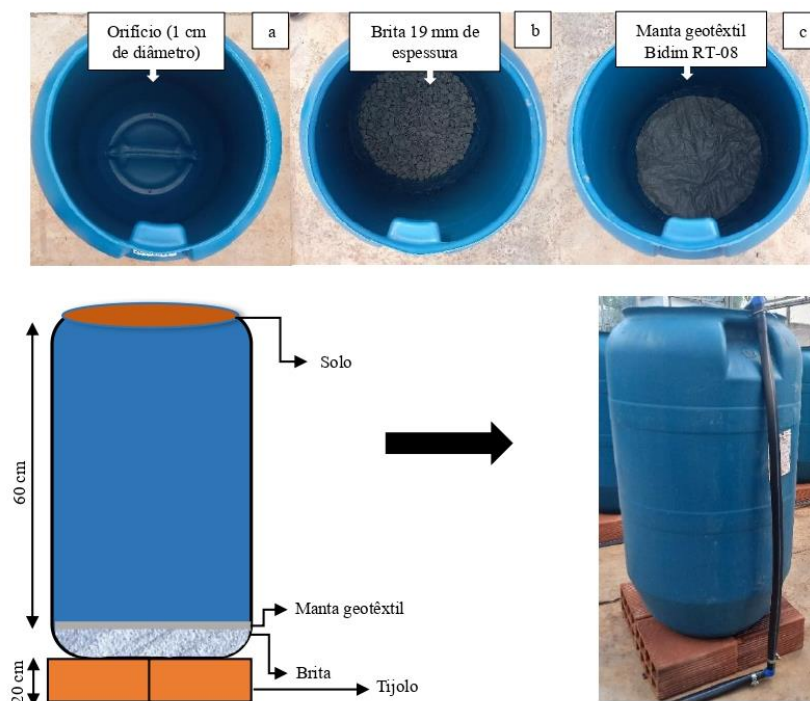


Figura 2. Esquema da unidade experimental

Vinte e sete dias após a aplicação do calcário, foi realizada a adubação de plantio em cada vaso, a uma profundidade de 30 cm no solo. As doses aplicadas foram de $255,0 \text{ mg dm}^3$ de nitrogênio (N), $340,0 \text{ mg dm}^3$ de fósforo (P), $425,0 \text{ mg dm}^3$ de potássio (K) e $127,5 \text{ mg dm}^3$ de enxofre (S), utilizando como fontes o sulfato de amônio, superfosfato triplo, cloreto de potássio e sulfato de amônio, respectivamente. Simultaneamente à adubação com macronutrientes, foram aplicados os tratamentos com Si.

A fonte de silicato utilizada no experimento foi um fertilizante de sílica amorfa, derivado de terra diatomácea (Agrisilica™ da Agripower Australia Limited). Este fertilizante contém 26% de Si disponível para as plantas, além de 1,5% de cálcio (Ca), 1,0% de magnésio (Mg) e 1,3% de ferro (Fe). O produto é apresentado na forma de grânulos com tamanho de 2,0 a 5,0 mm, possui um pH de 8,1, capacidade de troca catiônica (CTC) superior a $30,0 \text{ cmolc dm}^3$ e densidade de 900 kg m^3 (OLIVA et al., 2021).

A espécie utilizada neste estudo foi *Saccharum officinarum* L., especificamente a variedade RB041443, desenvolvida pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e lançada pela Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA) em julho de 2021. Esta variedade destaca-se por sua moderada tolerância ao déficit hídrico, demonstrando a capacidade de manter uma produtividade satisfatória mesmo em

condições de disponibilidade reduzida de água, especialmente quando comparada a outras variedades mais sensíveis.

A RB041443 apresenta uma série de atributos favoráveis, incluindo elevado potencial produtivo, tanto em tonelada de colmos por hectare (TCH) quanto em tonelada de açúcar por hectare (TAH). Além disso, ela é resistente a nematoides (*Meloidogyne incógnita*) e às ferrugens marrom e alaranjada, além de ser altamente adaptável a diferentes condições de solo e clima. A variedade também se destaca pela produção de colmos com alto teor de sacarose, uma característica essencial para a produção eficiente de açúcar e etanol. No entanto, como ocorre com muitas outras variedades, a produtividade e o acúmulo de sacarose podem ser afetados em situações de estresse hídrico prolongado ou severo.

Para o plantio, foram coletados toletes (colmos fracionados) da variedade RB041443 em uma área pública cultivada com cana-de-açúcar pertencente à EECAC - UFRPE. Os toletes, com gemas únicas, foram plantados a uma taxa de três gemas por vaso, 30 dias após a aplicação da calagem. Após a brotação, realizou-se o desbaste aos 20 DAP, deixando-se uma única planta por vaso.

A fertilização com micronutrientes foi realizada 56 dias após a aplicação do calcário, por meio de fertirrigação em dose única. As doses aplicadas por vaso foram as seguintes: 6,8 mg dm³ de manganês (Mn) na forma de MnSO₄·H₂O; 1,7 mg dm³ de boro (B) na forma de H₃BO₃; 0,3 mg dm³ de molibdênio (Mo) na forma de (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O; 1,7 mg dm³ de cobre (Cu) na forma de CuSO₄; e 0,9 mg dm³ de zinco (Zn) na forma de ZnSO₄·7H₂O. A adubação com ferro (Fe) não foi necessária, pois o solo já continha quantidades adequadas deste micronutriente. A recomendação de adubação tanto para macronutrientes quanto para micronutrientes foi baseada nas diretrizes para cultivo em vasos (DA SILVA et al., 2017) e nas exigências nutricionais específicas da cultura da cana-de-açúcar.

2.2 Tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi realizado em esquema fatorial 2 × 4, onde os tratamentos consistiram em dois níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura - ETc) e quatro doses de silício (Si): 0 (controle), 78, 117 e 156 kg ha⁻¹, equivalentes a 0, 39, 58 e 78 mg dm³ por vaso, respectivamente. Os tratamentos foram organizados em um delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro repetições.

A escolha dos níveis de irrigação de 50 e 20% da ETc teve como objetivo simular diferentes condições de disponibilidade hídrica em campo, típicas de regiões marginais com

problemas de déficit hídrico moderado e severo. As doses de Si foram estabelecidas com base nas recomendações para a cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.), que sugere a aplicação de 300,0 e 450,0 kg ha⁻¹ de sílica amorfa (26% de Si), equivalendo a 78,0 e 117,0 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente (JOHNSON et al., 2022). Além disso, foi testada uma dose de 600,0 kg ha⁻¹ de sílica amorfa, equivalente a 156,0 kg ha⁻¹ de Si (Agripower, NSW, Austrália).

2.3 Sistema de irrigação e manejo da água

A irrigação foi realizada utilizando água do sistema de abastecimento local da casa de vegetação, armazenada em dois reservatórios com capacidade de 100 L cada. O sistema de irrigação utilizado foi o de gotejamento, que empregou mangueiras cegas de polietileno de baixa densidade (com pressão nominal de 30 e diâmetro interno de 16 mm). As mangueiras foram equipadas com emissores autocompensantes de vazão nominal de 2,0 L/h (modelo Gotejador Netafim PCJ CNL), posicionados em cada vaso de 80 L, com um espaçamento de 0,50 m.

O sistema foi montado com uma unidade de abastecimento de água composta por dois reservatórios de 100 L, cada um equipado com uma eletrobomba de 0,5 CV, que transportava a água para as linhas de distribuição. O sistema também incluiu dois filtros modulares de tela de ¾" para remover partículas sólidas indesejadas, duas válvulas de esfera para controle manual da vazão de água em cada tratamento, dois manômetros para manter a pressão de serviço do sistema em 10 m.c.a., e dois temporizadores digitais para programar o tempo de irrigação, controlando o acionamento e desligamento das eletrobombas (Figura 4).

Cada reservatório, juntamente com sua respectiva eletrobomba, filtro e temporizador digital, formaram um sistema independente, garantindo o transporte eficiente da água para as linhas de distribuição. As tubulações principais, com diâmetro de 20 mm, foram conectadas a mangueiras cegas de polietileno de baixa densidade (PEBD) com pressão nominal de 30 e diâmetro interno de 16 mm, compondo as duas linhas centrais. Essas linhas derivavam-se em subunidades de irrigação, que interligavam os emissores às linhas de distribuição de água, conforme os tratamentos estabelecidos (Figura 4).

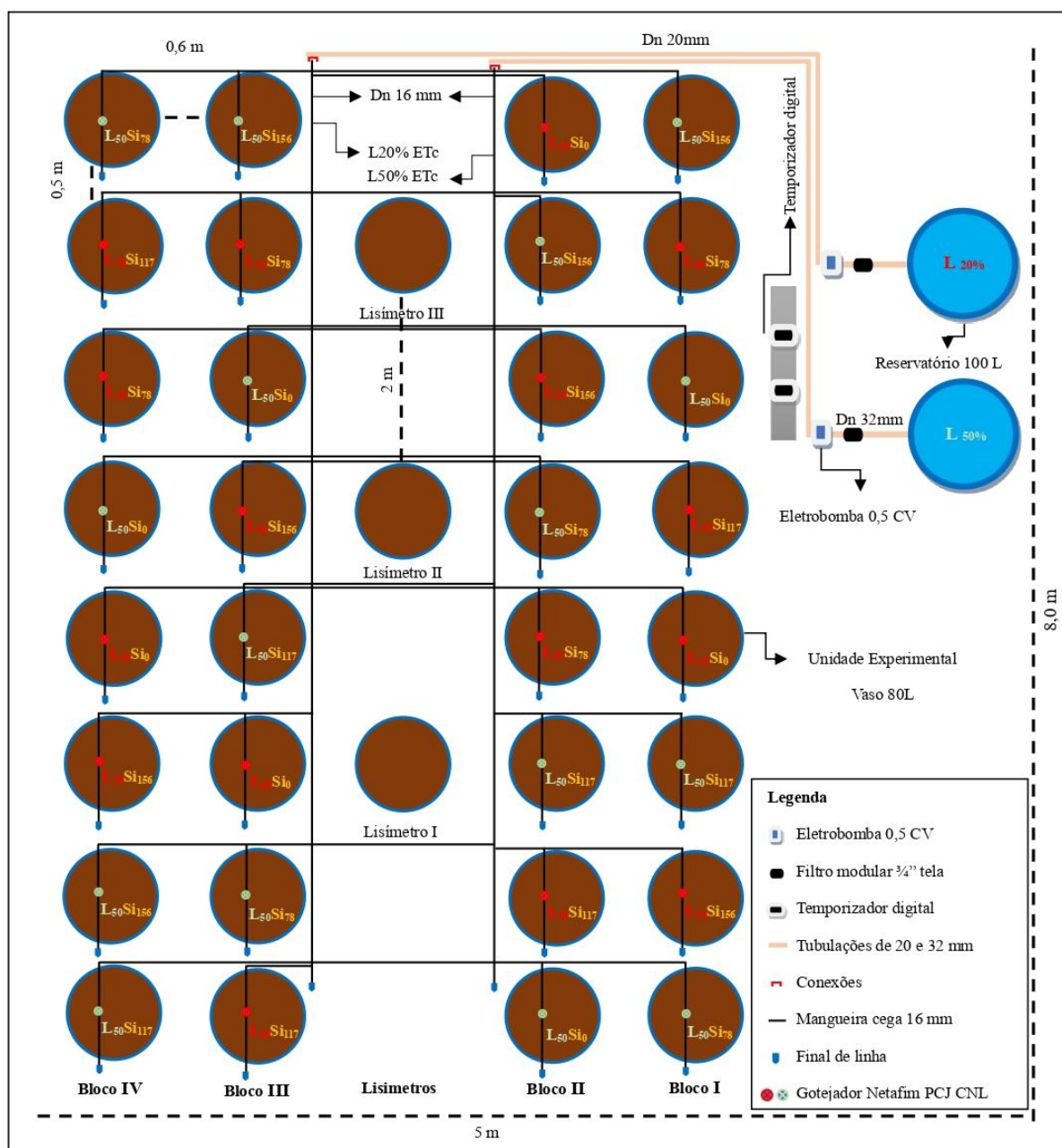


Figura 3. Esquema experimental e do sistema de irrigação

O tempo de irrigação para cada tratamento foi ajustado a cada dois dias, levando em consideração o volume bruto (V_b) de irrigação necessário. Esse volume foi calculado com base na relação entre o volume evapotranspirado (V_e) para 100% da ETc e a eficiência de aplicação do sistema de irrigação, que foi de 96,6%, conforme determinado em um ensaio de uniformidade de distribuição de água, realizado de acordo com a metodologia proposta por Merriam e Keller (1978).

O cálculo do tempo de irrigação foi feito usando a razão entre o volume bruto de irrigação (V_b) e a vazão do gotejador (q_e) ($T_i = V_b/q_e$). As lâminas de déficit foram aplicadas de acordo com os tratamentos, que consistiram na reposição de 50 e 20% da ET_c (frações de 0,5 e 0,2 da ET_c). Antes da aplicação dos tratamentos com déficits hídricos, a irrigação foi realizada com 100% da ET_c , mantendo o solo na capacidade de campo. A diferenciação dos tratamentos teve início aos 60 DAP. A irrigação foi programada para as 15:00 h, um período mais ameno, visando minimizar o estresse térmico nas plantas.

A ET_c foi estimada diariamente através da média do balanço hídrico de três lisímetros de percolação com capacidade de 80 L de maneira direta, conforme equação 1 (REICHARDT e TIMM, 2022) (Figura 4a, b), cultivados com a mesma cultura avaliada no experimento (cana-de-açúcar).

$$ET_c = I - D \quad \text{Eq. 1}$$

Onde,

ET_c é a evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}), I é a água colocada (irrigação) e D é a água percolada (drenagem).

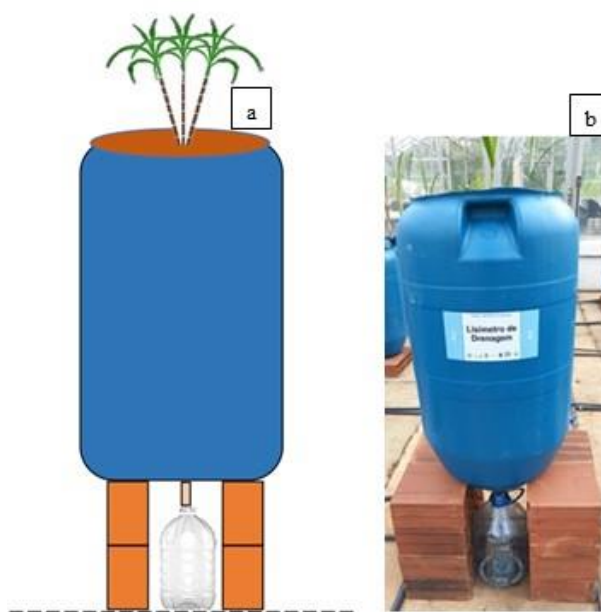


Figura 4. Lisímetro de drenagem, dispositivo utilizado para medir a quantidade de água que percola pelo solo.

O balanço hídrico nos lisímetros foi realizado diariamente, com medições a cada 24 h, para determinar o consumo total de água pela cultura. Este consumo foi obtido pela diferença entre a quantidade de água aplicada (irrigação) e a quantidade percolada (drenagem) (Equação 1). Os lisímetros foram inseridos na parte central da área experimental espaçados em 2,0 m entre plantas e 0,5 m entre linhas (Figura 3), dispostos sobre bancada de tijolo a 0,50 m de altura do piso com um coletor para medir a água percolada (Figura 4b).

2.4 Variáveis avaliadas

2.4.1 Potencial hídrico foliar

Aos 150 DAP, o potencial hídrico foliar (Ψ_w) foi determinado na extremidade da lâmina foliar da folha +2 utilizando uma câmara de pressão Scholander (modelo 615D da PMS Instrument Company). A pressão foi aplicada até a exsudação da seiva, observada por meio do corte realizado na folha e visualizada na nervura central (Turner, 1981). As medições ocorreram nas primeiras horas da madrugada, entre as 1h e 3h.

2.4.2 Ajustamento osmótico

O ajustamento osmótico (AO) foi determinado no terço médio da lâmina foliar das mesmas folhas que foram utilizadas para determinação do potencial hídrico aos 150 DAP. As folhas foram postas para saturar em sacos plásticos totalmente preenchidos por água destilada, por 24h a 4°C no escuro. Após atingirem o completo turgor, as folhas foram secas em papel toalha e após esse processo foram maceradas em nitrogênio líquido e a seiva extraída foi filtrada e centrifugada a 10.000 g por 15 minutos a 4°C. Uma alíquota de 10 μ L do sobrenadante foi utilizada para a determinação da osmolalidade, com um osmômetro de pressão de Vapor (VAPRO, Modelo 5600, Wescor). Os valores obtidos em milimoles por quilograma foram convertidos em potencial osmótico (Ψ_o) a partir da equação de Van't Hoff. Os resultados para o ajustamento osmótico, foram obtidos a partir da diferença entre o potencial osmótico das plantas controle em relação as plantas estressadas por meio da equação 3 (BLUM, 1989).

$$AO_{\text{total}} = \Psi_{oc}^{100} - \Psi_{os}^{100} \quad \text{Eq. 3}$$

Em que,

AO_{total} = Ajustamento osmótico total;

Ψ_{OC}^{100} = Potencial osmótico das plantas controle a pleno turgor;

Ψ_{OS}^{100} = Potencial osmótico das plantas estressadas a pleno turgor.

2.4.3 Conteúdo de silício

O teor de silício nas folhas e colmos foi obtido pela extração do elemento com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e hidróxido de sódio (NaOH). A reação foi induzida em forno de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, Brasil) a 95°C conforme metodologia descrita por Kraska e Breitenbeck (2010). A leitura foi realizada pelo método colorimétrico com ácido clorídrico, ácido oxálico e molibdato de amônio em espectrofotômetro (B442, Micronal, Brasil) a 410 nm, conforme indicado por Korndörfer et al. (2004).

2.4.4 Conteúdo de carbono, nitrogênio e fósforo

O teor de carbono (C) nas folhas e colmos foi determinado por uma etapa de oxidação utilizando dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em um ambiente ácido. Em seguida, titulado para determinar a quantidade de carbono presente na amostra (TEDESCO et al., 1995). O Teor de (N) nas folhas e colmos foi extraído por meio digestão em ácido sulfúrico, seguida de destilação pelo método Kjeldahl e titulação com solução diluída de HCl (EMBRAPA, 2009).

O teor de (P) nas folhas e colmos foi determinado por digestão de amostras com mistura ácido nítrico e ácido perclórico. Sequencialmente, foram aquecidas em blocos digestores até atingirem 210 °C, com uma elevação de temperatura gradual de 40 °C a cada 30 minutos, com temperatura inicial de 80° C. Após a digestão, as amostras foram deixadas esfriar até atingirem a temperatura ambiente (25°C). Posterior a isso, foram adicionados 30 mL de água deionizada quente e transferidas para frascos de 50 mL e deixada em repouso por 12 horas para permitir a sedimentação das fibras. Uma vez que as fibras se sedimentaram, 2 mL do extrato da amostra foram retirados e transferidos para tubos de ensaio. Em seguida, foram adicionados 3 mL de água deionizada e 2 mL de uma mistura de reagentes contendo molibdato de amônio a 5% e vanadato de amônio a 0,25%. Após agitar a mistura, aguardou-se 5 minutos para realizar a leitura da absorbância a 420 nm utilizando um espectrofotômetro digital visível (BATAGLIA et al., 1983).

2.4.5 Razões estequiométricas Silício: Carbono: Nitrogênio: Fósforo

As razões estequiométricas C:Si, C:N, C:P e N:P foram determinadas a partir da razão entre os teores desses elementos nos tecidos vegetais, como folhas e colmos.

2.4.6 Eficiências de uso de carbono, nitrogênio e fósforo

As eficiências de uso de C, N e P foram calculadas segundo SIDDIQI e GLASS (1981), a partir do quociente entre o quadrado da matéria seca pelo acúmulo de nutrientes (g de nutriente acumulado). Assim, foi utilizada a seguinte equação:

$$Eficiência\ de\ uso\ (g^2\ g^{-1}) = \frac{(Matéria\ seca^2)}{C\ conteúdo} \quad \text{Eq.4}$$

$$Eficiência\ de\ uso\ (g^2\ g^{-1}) = \frac{(Matéria\ seca^2)}{N\ conteúdo} \quad \text{Eq.5}$$

$$Eficiência\ de\ uso\ (g^2\ g^{-1}) = \frac{(Matéria\ seca^2)}{P\ conteúdo} \quad \text{Eq.6}$$

2.4.7 Produção de massa seca

Aos 150 DAP, as plantas de cana-de-açúcar foram colhidas e divididas em folhas verdes, folhas secas e colmos. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até massa constante para obtenção da massa seca de cada parte da planta.

2.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância por meio do teste F ($p \leq 0,05$) após verificação da normalidade e homogeneidade das variâncias (teste W de Shapiro-Wilk e teste de Bartlett). A análise fatorial foi utilizada para testar os principais efeitos do nível de irrigação (ETc) e do suprimento de silício (Si) e suas interações (ETc × Si), com um total de 32 unidades experimentais. Os dados quantitativos, correspondentes às doses de Si, foram analisados por meio de modelos de regressão linear e polinomial. Os dados qualitativos, correspondentes aos níveis de reposição da evapotranspiração da cultura (ETc), foram analisados pelo teste de

comparação de médias de Tukey ($p \leq 0,05$). A seleção do modelo de regressão baseou-se na significância dos modelos propostos e no maior valor do coeficiente de determinação.

A diferença entre os tratamentos também foi analisada por meio de análises multivariadas de clusters hierárquicos. A análise de agrupamento baseou-se no coeficiente de similaridade da distância euclidiana e na ligação do grupo pelo método de método de Ward. As análises estatísticas foram realizadas utilizando a linguagem de programação R (versão 4.4.0, R Core Team).

3. RESULTADOS

3.1 Potencial hídrico foliar e ajustamento osmótico

O potencial hídrico apresentou interação significativa ($p < 0,01$) entre os níveis de irrigação e as doses de Si, ajustando-se a um modelo polinomial quadrático. Os potenciais hídricos foliares máximos foram observados nas doses de 80,0 e 95,0 kg ha⁻¹ de Si, correspondendo a -0,27 e -1,30 MPa sob condições de 50% e 20% da ETc, respectivamente (Figura 5a). Para o ajustamento osmótico, a aplicação de 85,0 kg ha⁻¹ de Si resultou em um valor máximo de 0,42 MPa, o que representa um aumento de 20,5% em relação ao controle (0 kg Si ha⁻¹) (Figura 5b).

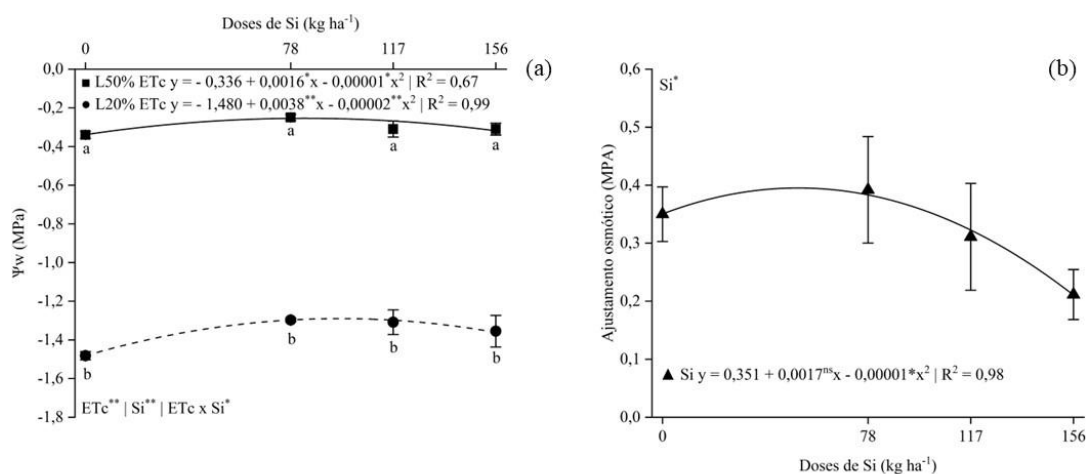


Figura 5. Potencial hídrico (a) e ajustamento osmótico (b) em plantas de cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha⁻¹). L50% (Lâmina de 50% da ETc) e L20% (Lâmina de 20% da ETc). As letras indicam diferenças significativas entre os níveis de irrigação (ETc) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). ns, * e ** indicam não

significativo e significância nos níveis de probabilidade de 5% e 1%, respectivamente, com base no teste F. As barras representam o desvio padrão; $n = 4$.

3.2 Conteúdo de silício, carbono, nitrogênio e fósforo em folhas e colmos

Para o teor de Si nas folhas (Figura 6a), houve interação (ETc x Si) significativa ($p < 0,01$), ou seja, as doses de Si resultaram em aumento no teor de Si seguindo um ajuste polinomial quadrático nos dois regimes hídricos. Os teores máximos de Si nas folhas foram de 14,80 e 14,48 g kg^{-1} , obtidos com as doses de Si de 130,0 e 96,3 kg ha^{-1} , respectivamente, para a condição de 50 e 20% da ETc (Figura 6a). No teor de Si no colmo, a interação ETc x Si foi significativa ($p < 0,05$), os teores máximos de Si de 7,02 e 7,32 g kg^{-1} , foram obtidos com as doses de Si de 82,1 e 85,0 kg ha^{-1} , respectivamente, sob as condições de 50 e 20% da ETc (Figura 6b). A condição de 20% da ETc resultou em um maior aumento do teor de Si nos colmos da cana-de-açúcar, em comparação com a condição de 50% da ETc. Além disso, observou-se que o teor de Si foi maior nas folhas (Figura 6a), em comparação com os colmos (Figura 6b).

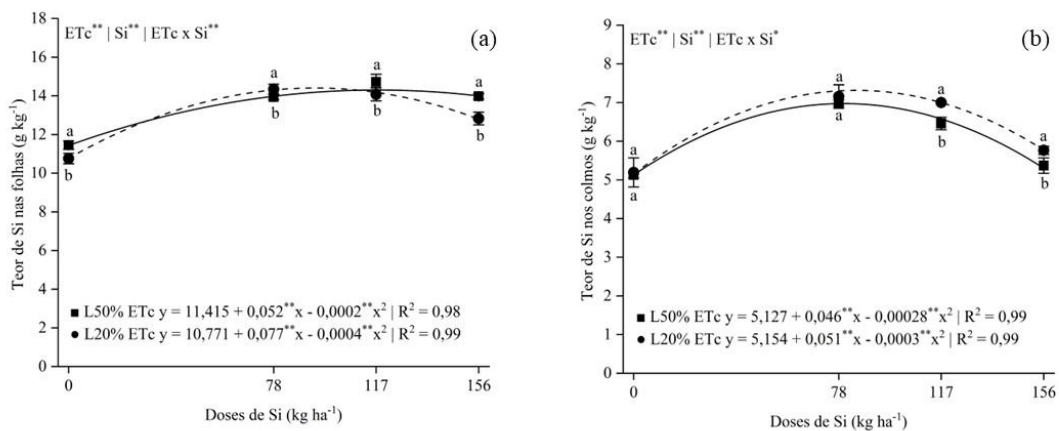


Figura 6. Teores de silício (Si) nas folhas (a) e colmos (b) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha^{-1}). L50% (Lâmina de 50% da ETc) e L20% (Lâmina de 20% da ETc). As letras indicam diferenças significativas entre os níveis de irrigação (ETc) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e ** Indicam significância nos níveis de probabilidade de 5% e 1%, respectivamente, com base no teste F. As barras representam o desvio padrão; $n = 4$.

O fornecimento de Si reduziu os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) nas folhas e colmos das plantas de cana-de-açúcar. No entanto, aumentou os teores de fósforo (P) tanto nas folhas quanto nos colmos (Figura 7). Os teores de C nas folhas (Figura 7a) e colmos (Figura 7b) das plantas de cana-de-açúcar foram influenciados apenas pelo fator dose de Si de forma isolada ($p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente), com ajuste polinomial quadrático. Os teores mínimos de C nas folhas e colmos foram 444,60 e 432,39 g kg⁻¹, respectivamente, obtidos com as doses de 88,9 (Figura 7a) e 94,8 kg Si ha⁻¹ (Figura 7b).

Para os teores de N nas folhas e colmos houve efeito para os fatores isolados, níveis de ETc e doses de Si (Figura 7c, d, e, f). Nas plantas adubadas com Si, os teores mínimos de N nas folhas e nos colmos foram 7,44 e 4,07 g kg⁻¹, respectivamente, obtidos com as doses de 100,0 e 98,3 kg Si ha⁻¹ (Figura 7d, f). Apesar da redução nos teores de N nas folhas e colmos da cana-de-açúcar promovida pelo Si, observou-se que a condição de déficit hídrico severo (20% da ETc), resultou em aumentos de 4,0 e 90,8 % nos teores de N nas folhas e colmos, respectivamente, em comparação com a condição de déficit hídrico moderado (50% da ETc) (Figura 7c, e).

O teor de P nas folhas e colmos das plantas apresentou efeitos de interação ($p < 0,01$) entre os níveis de ETc e doses de Si (Figura 7g, h). Nas folhas, os teores máximos de P foram de 1,56 e 1,77 g kg⁻¹, obtidos com as doses de 110,7 e 107,1 kg Si ha⁻¹ de Si, respectivamente, para as condições de 50 e 20% da ETc (Figura 7g). Já para o teor de P nos colmos, as doses de Si de 96,9 e 117,2 kg ha⁻¹ resultaram em valores máximos de P de 1,59 e 1,54 g kg⁻¹, respectivamente, seguindo um ajuste polinomial quadrático nos níveis de irrigação de 50 e 20 % da ETc (Figura 7h).

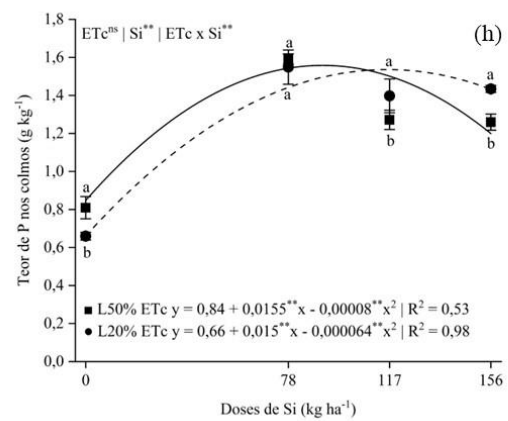
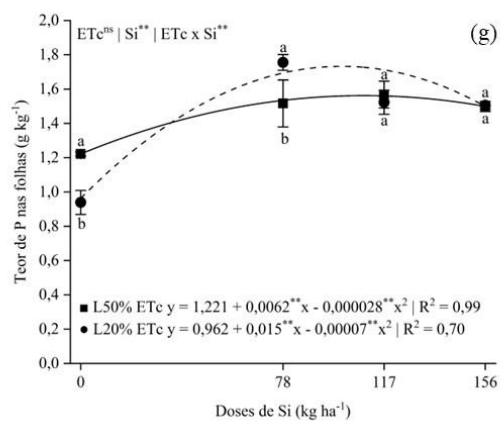
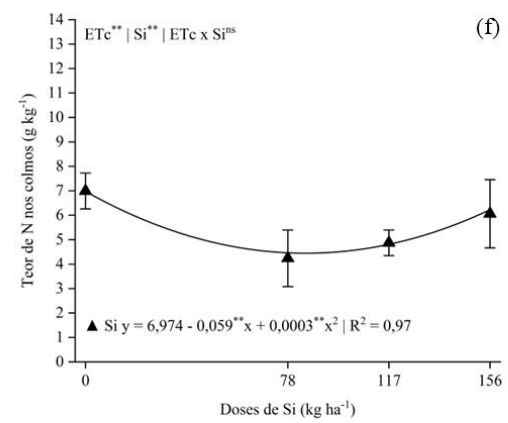
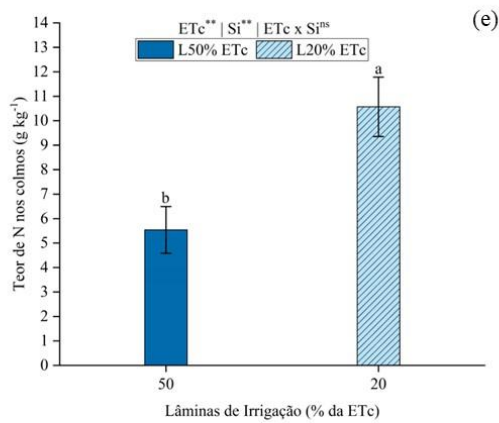
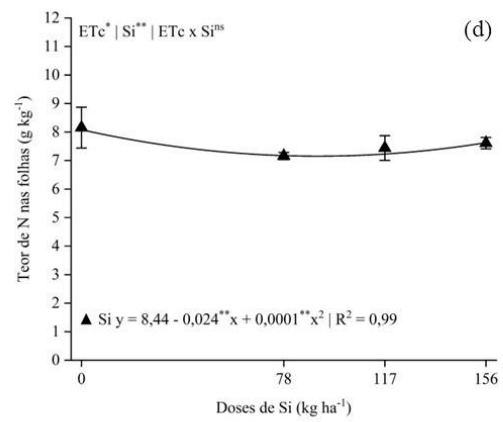
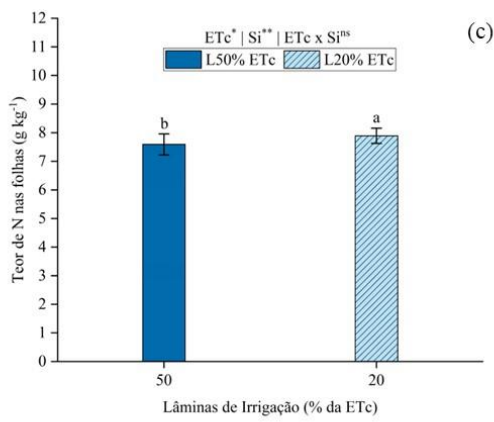
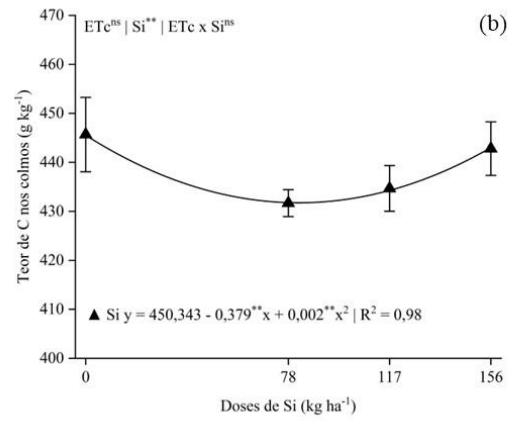
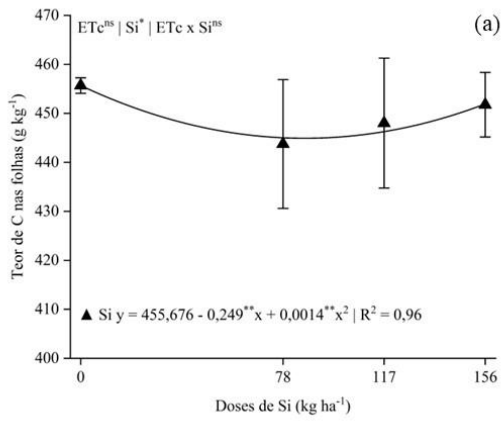


Figura 7. Teores de carbono C (a, b), N (c, d, e, f) e P (g, h) nas folhas e colmos em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha⁻¹). L50% (Lâmina de 50% da ETc) e L20% (Lâmina de 20% da ETc). As letras indicam diferenças significativas entre os níveis de irrigação (ETc) em cada dose de Si (g, h) e entre lâmina de irrigação (ETc) (c, e) ($p < 0,05$, teste de Tukey). ns, * e ** indicam não significativo e significância nos níveis de probabilidade de 5% e 1%, respectivamente, com base no teste F. As barras representam o desvio padrão; $n = 4$.

3.3 Razões estequiométricas de C:Si, C:N, C:P e N:P em folhas e colmos

O uso do Si diminuiu a razão estequiométrica C:Si em folhas e colmos de cana-de-açúcar cultivada sob a condição de 50 e 20% da ETc. A relação C:Si nas folhas e colmos das plantas apresentaram efeitos interativos entre os níveis de irrigação e doses de Si ($p < 0,01$) (Figura 8a, b). Nas folhas, as relações C:Si mínimas foram de 30,48 e 30,44, alcançadas com doses de Si de 115,7 e 91,8 kg ha⁻¹, para as condições de 50 e 20% da ETc, respectivamente (Figura 8a). Por outro lado, nas relações estequiométricas C:Si nos colmos, as doses de Si de 82,7 e 89,5 kg ha⁻¹, resultaram em valores mínimos de 63,57 e 60,00, respectivamente, para as condições de 50 e 20% da ETc (Figura 8b). A maior relação C:Si nas folhas e nos colmos das plantas de cana-de-açúcar foi observada no tratamento controle (0,0 kg Si ha⁻¹) em ambos os níveis de irrigação.

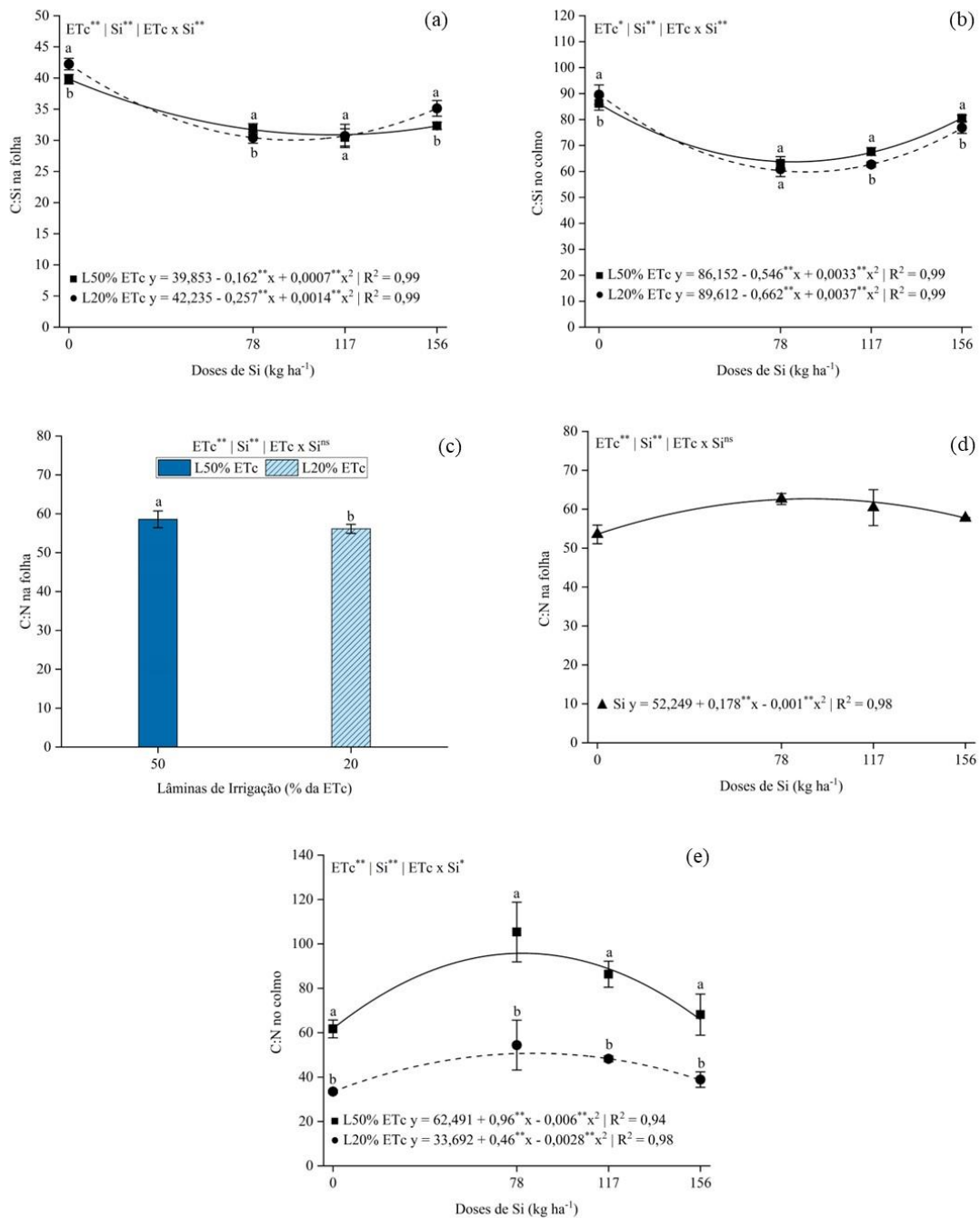


Figura 8. Razões C:Si (a, b) e C:N (c, d, e) nas folhas e colmos em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha⁻¹). L50% (Lâmina de 50% da ETc) e L20% (Lâmina de 20% da ETc). As letras indicam diferenças significativas entre os níveis de irrigação (ETc) em cada dose de Si (a, b, e) ($p < 0,05$) e entre lâmina de irrigação (ETc) (c) ($p < 0,05$, teste de Tukey). ^{ns}, * e ^{**} indicam não significativo e significância nos níveis de probabilidade de 5% e 1%, respectivamente, com base no teste F. As barras representam o desvio padrão; $n = 4$.

Para a relação C:N na folha da cana-de-açúcar, observou-se efeito significativo ($p < 0,01$) dos fatores isolados, níveis de ETc e doses de Si (Figura 8c, d). A condição de 20% da ETc reduziu a relação C:N da folha em 4,17 % quando comparada com a condição de 50% da ETc (Figura 8c). Porém o fornecimento de Si na dose de 89,0 kg ha⁻¹, resultando em um valor máximo de 60,17 para a relação C:N na folha (Figura 8d). No colmo, a relação C:N foi influenciada pela interação entre os fatores (ETc x Si) ($p < 0,05$) (Figura 8e). O efeito das doses de Si resultou em um ajuste polinomial quadrático para os dois níveis de irrigação (50 e 20% da ETc). As relações máximas de C:N nos colmos, de 100,89 e 53,33, foram observadas com doses de Si de 80,0 e 83,8 kg ha⁻¹, respectivamente, para as condições de 50 e 20% da ETc (Figura 8e).

A razão estequiométrica de C:P e N:P em folhas e colmos da cana-de-açúcar foi influenciada pelo efeito da interação entre os fatores ($p < 0,01$) (ETc x doses de Si) (Figura 9a, b, c, d). A aplicação de Si no solo, tanto na condição de 50% quanto de 20% da ETc, resultou em redução das relações estequiométricas C:P e N:P nas folhas e nos colmos de cana-de-açúcar. Os valores mínimos das razões de C:P nas folhas 280,71 e 248,36, foram observados com doses de Si de 107,1 e 109,1 kg Si ha⁻¹, respectivamente, para as condições de 50 e 20% da ETc, (Figura 9a). Para os colmos, as doses de Si que forneceram a razão mínima C:P, de 290,38 e 272,03 foram 101,9 e 115,2 kg Si ha⁻¹, respectivamente, sob as mesmas condições de déficit hídrico (Figura 9b). Para N:P nas folhas, os valores mínimos foram 4,55 e 4,03, alcançados com as doses de Si de 102,5 e 110,0 kg ha⁻¹, respectivamente, nas condições de 50 e 20% da ETc, (Figura 9c). Nos colmos, os valores mínimos de N:P foram 2,55 e 5,47, nas condições hídricas de 50 e 20% da ETc, respectivamente, com as doses de Si de 100,87 e 105,8 kg ha⁻¹ (Figura 9d).

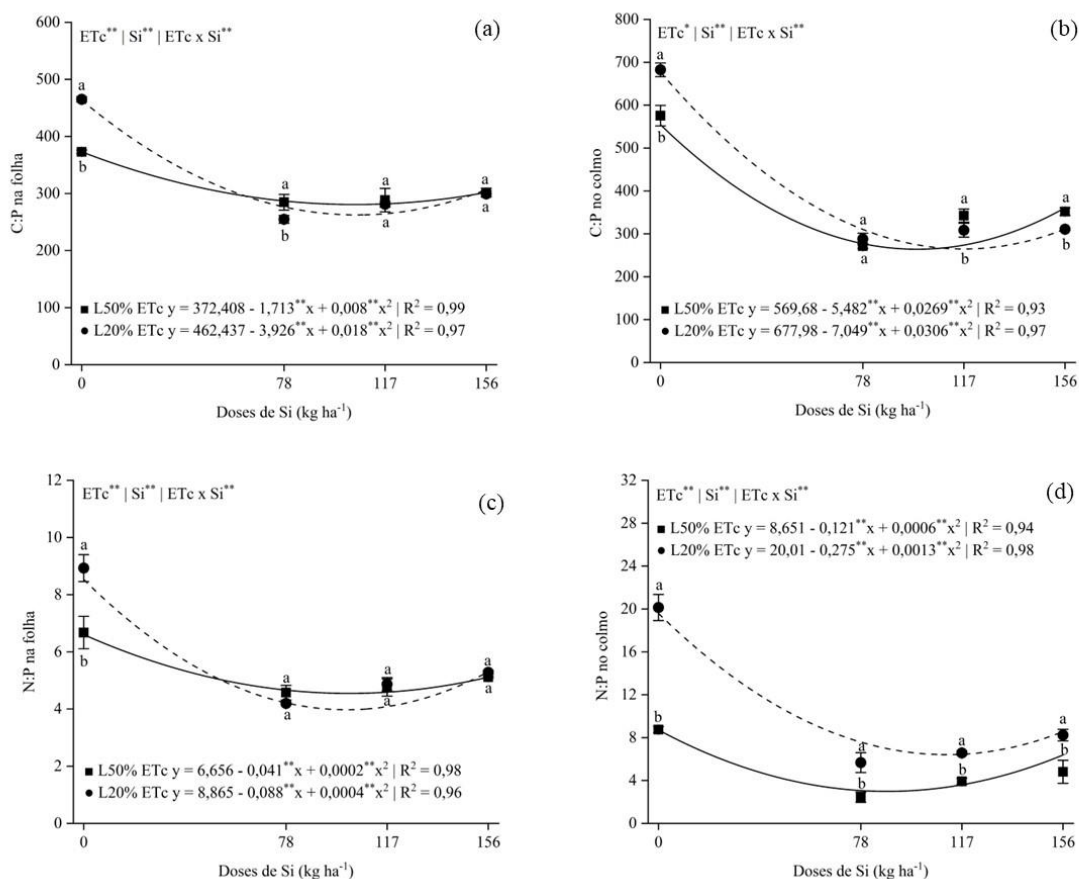


Figura 9. Razões C:P (a, b) e N:P (c, d) nas folhas e colmos em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETC), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha⁻¹). L50% (Lâmina de 50% da ETC) e L20% (Lâmina de 20% da ETC). As letras indicam diferenças significativas entre os níveis de irrigação (ETC) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). ns, * e ** indicam não significativo e significância nos níveis de probabilidade de 5% e 1%, respectivamente, com base no teste F. As barras representam o desvio padrão; $n = 4$.

3.4 Eficiência de uso de C, N, P e produção de matéria seca

A interação (ETC x Si) foi significativa ($p < 0,05$) para a eficiência de uso de carbono (C) e nitrogênio (N) nas plantas de cana-de-açúcar cultivada nas condições de déficit hídrico severo (20% da ETC) e moderado (50% da ETC) (Figura 10a, b). O efeito das doses de Si resultou em um ajuste polinomial quadrático em ambas as condições (50 e 20% da ETC). As eficiências máximas de uso de C pelas plantas foram de 1.423,14 e 1.267,57 g² g⁻¹, obtidas com as doses de Si de 98,4 e 99,6 kg ha⁻¹ sob condições de 50 e 20% da ETC, respectivamente (Figura 10a).

No que diz respeito à eficiência de uso de N, os valores máximos foram de 95.438,9 e 71.482 $\text{g}^2 \text{g}^{-1}$, com as doses de Si de 77,0 e 83,3 kg ha^{-1} para as condições de déficit hídrico moderado e severo, respectivamente (Figura 10b). Foi observada uma menor eficiência de uso de C e N na condição de irrigação com 20% da ETc em comparação com a condição de 50% da ETc.

Sobre a eficiência de uso de P, os fatores (ETc x Si) afetaram as plantas de forma isolada ($p < 0,01$) (Figura 10c, d). A condição de déficit hídrico moderado (50% da ETc), resultou em aumento de 15,92% na eficiência de uso de P em comparação com o cultivo das plantas na condição de déficit hídrico severo (20% da ETc) (Figura 10c). No entanto, a aplicação de Si reduziu linearmente os valores da eficiência de uso de P em 36,80 % entre a maior dose (156,0 kg ha^{-1} de Si) e a menor dose (0,0 kg ha^{-1} de Si) (Figura 10d).

A massa seca da folha apresentou efeito significativo ($p < 0,01$) para os fatores isolados níveis de ETc e doses de Si (Figura 11a, b). Observou-se que a condição de 20% da ETc (déficit hídrico severo) provocou uma redução de 14,06% na massa seca da folha em comparação com a condição de 50% da ETc (Figura 11a). Porém, a aplicação de Si na dose de 83,7 kg ha^{-1} resultou uma produção máxima de massa seca da folha de 420,58 g por planta (Figura 11b).

Na produção da massa seca do colmo em plantas de cana-de-açúcar, foi observado efeito de interação entre níveis de ETc e as doses de Si ($p < 0,01$), com ajuste polinomial quadrático para as doses de Si em ambas as condições de regime hídrico estudadas. Os resultados mostraram valores máximos de 180,61 e 128,69 g por planta de massa seca do colmo com o uso das doses de Si de 84,2 e 89,5 kg ha^{-1} , respectivamente, para as condições de 50 e 20% da ETc (Figura 11c). O déficit hídrico severo (20% da ETc) diminuiu a massa seca da parte aérea em 20,3 % quando comparado à condição de déficit hídrico moderado (50% da ETc) (Figura 11d). No entanto, nas plantas de cana-de-açúcar a adubação com Si aumentou a massa seca da parte aérea, com máxima produção estimada de 600,09 g por planta na dose de Si de 80,7 kg ha^{-1} (Figura 11e).

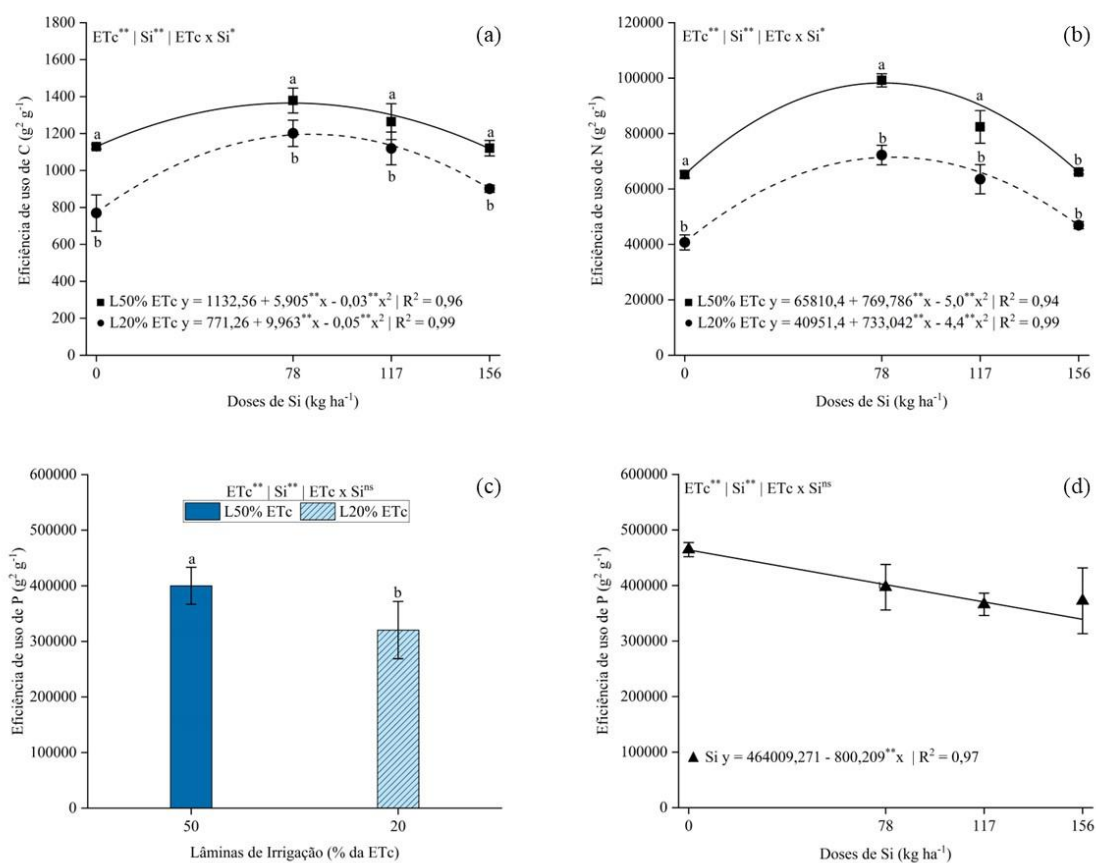


Figura 10. Eficiência de uso de carbono (C) (a), nitrogênio (N) (b) e fósforo (P) (c, d) em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 $kg ha^{-1}$). L50% (Lâmina de 50% da ETc) e L20% (Lâmina de 20% da ETc). As letras indicam diferenças significativas entre os níveis de irrigação (ETc) em cada dose de Si (a, b) e entre lâmina de irrigação (ETc) (c) ($p < 0,05$, teste de Tukey). ^{ns}, * e ** indicam não significativo e significância nos níveis de probabilidade de 5% e 1%, respectivamente, com base no teste F. As barras representam o desvio padrão; $n = 4$.

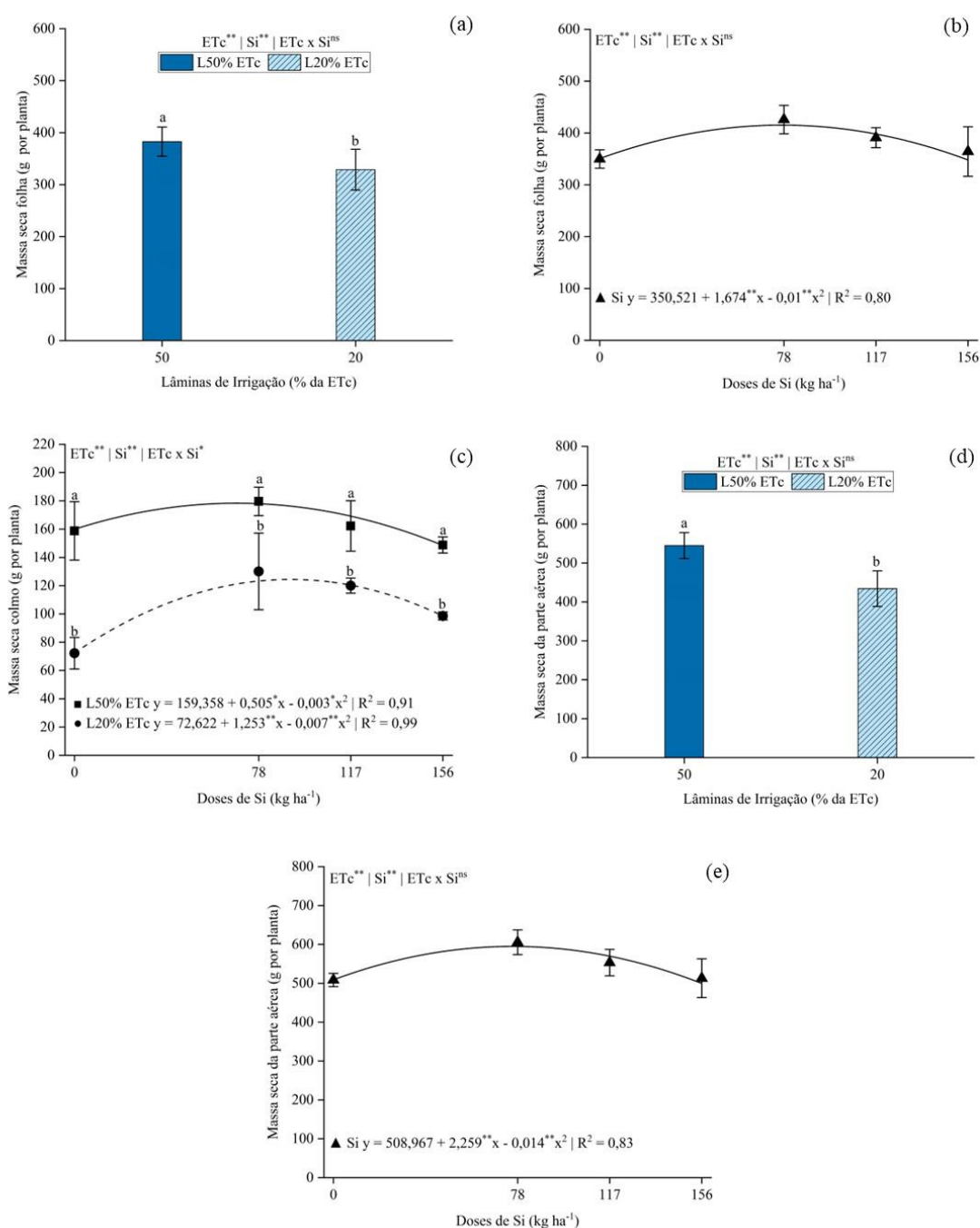


Figura 11. Massa seca folha (a, b), massa seca colmo (c) e massa seca parte aérea (d, e) nas folhas e colmos em cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas a quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha⁻¹). L50% (Lâmina de 50% da ETc) e L20% (Lâmina de 20% da ETc). As letras indicam diferenças significativas entre os níveis de irrigação (ETc) em cada dose de Si (c) e entre lâmina de irrigação (ETc) (a, d) ($p < 0,05$, teste de Tukey). ns, * e ** indicam não significativo e significância nos níveis de probabilidade de 5% e 1%, respectivamente, com base no teste F. As barras representam o desvio padrão; $n = 4$.

3.5 Análise multivariada

3.5.1 Análise hierárquica de cluster

Nos mapas de calor para as folhas (Figura 12a), os resultados evidenciam que a combinação de 20% da ETc com 117,0 kg ha⁻¹ de Si foi eficaz em otimizar as concentrações de C, N e Si, em comparação com as plantas sob outras condições de tratamento. Isso é refletido pela maior intensidade de cor (tons de vermelho) observada nessa combinação. Para os colmos (Figura 12b), os padrões de agrupamento seguem uma tendência similar, com os resultados indicando que a combinação (ETc x Si) que maximizou a eficiência de uso de carbono (EUC) nas plantas de cana-de-açúcar foi na condição de 50% da ETc com a dose de 78 kg ha⁻¹ de Si, indicando uma maior eficiência na conversão de carbono em biomassa no colmo sob essas condições.

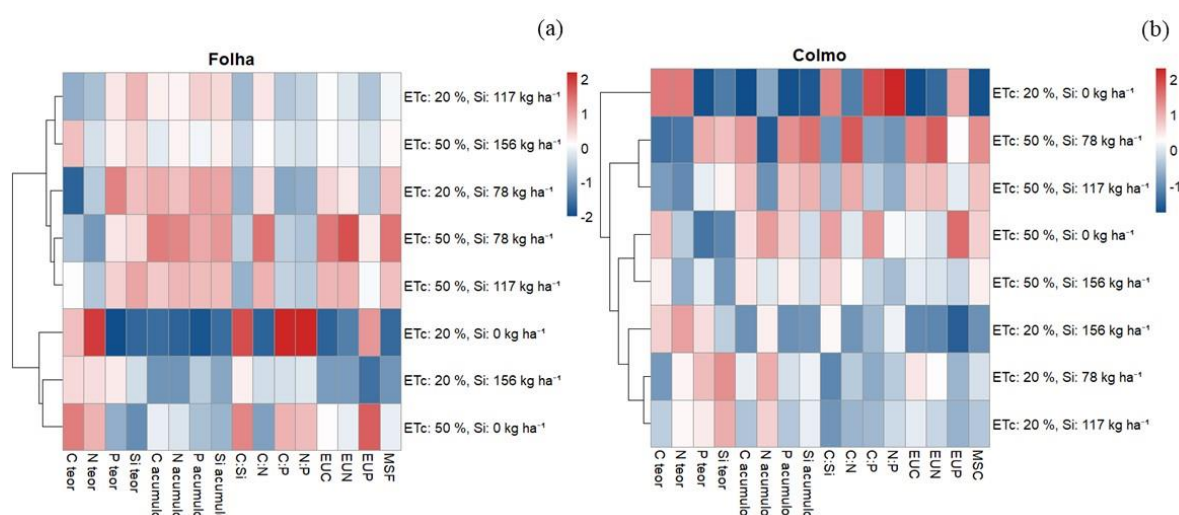


Figura 12. Mapa de calor de agrupamento hierárquico das variáveis resposta, concentrações e acúmulos de C, N, P e Si, razões estequiométricas de C:N:P:Si, eficiência de uso de C, N e P e partição de massa seca em folhas (a) e colmos (b) em plantas de cana-de-açúcar cultivada em diferentes níveis de irrigação (50 e 20% da evapotranspiração da cultura – ETc), as plantas foram submetidas as quatro doses de Si (0, 78, 117 e 156 kg ha⁻¹). EUC: eficiência de uso de carbono; EUN: eficiência de uso de nitrogênio; EUP: eficiência de uso de fósforo.

4. DISCUSSÃO

A aplicação de Si no solo na forma de fertilizante de sílica amorfa, derivado de terra diatomácea, aumentou a disponibilidade de Si para as plantas de cana-de-açúcar. As concentrações de Si nas folhas atingiram 1,4% do peso seco, enquanto nos colmos essas concentrações foram de 0,7% do peso seco, sob condições de 50 e 20% da ETc (Figura 6a, b). Esses resultados estão em consonância com estudos anteriores em cana-de-açúcar (OLIVA et al., 2021; CAMARGO et al., 2023; COSTA et al., 2023). A elevada concentração de Si nas folhas, observada neste estudo, pode ser explicada pelo fato de a cana-de-açúcar ser uma planta reconhecidamente acumuladora de Si, com teores foliares superiores a 10,0 g kg⁻¹ (MA; YAMAJI, 2006; MA; TAKAHASHI, 2002), possuindo uma elevada capacidade de absorção radicular deste elemento (MITANI-UENO; MA, 2021; OLIVERA-VICIEDO et al., 2024).

A elevada absorção de Si pela cana-de-açúcar neste estudo pode ser atribuída à absorção ativa do elemento, possivelmente devido à presença de transportadores eficientes de Si em suas raízes. Além disso, a alta solubilidade da sílica amorfa, que disponibiliza Si de forma eficaz para as plantas, também pode explicar os resultados obtidos. Estudos anteriores demonstraram que a sílica amorfa é mais solúvel em comparação com outras fontes de Si amplamente utilizadas (FRAYSSE et al., 2009; ELLERBROCK; STEIN; SCHALLER, 2022), como escória e silicatos de Ca, Mg e K (DO NASCIMENTO et al., 2021). Pesquisas indicam que a aplicação de 4 e 8 t ha⁻¹ de duas fontes de Si (Calmasil® e Slagment®) em três variedades de cana-de-açúcar resultou em concentrações de Si nas folhas raramente superiores a 5,0 g kg⁻¹ (KEEPING; MEYER; SEWPERSAD, 2013).

Embora a sílica amorfa seja reconhecida por sua alta solubilidade e por fornecer uma fonte prontamente disponível de Si para as plantas, os resultados deste estudo indicaram uma diminuição na absorção de Si em doses mais elevadas. Essa observação pode ser explicada por uma combinação de fatores fisiológicos e bioquímicos que limitam a eficiência de absorção, mesmo quando há uma oferta abundante de Si. Esses achados sublinham a importância de se determinar uma dose ótima de aplicação de Si, onde os benefícios agrônômicos sejam maximizados sem que ocorram limitações na absorção.

Os danos causados pelo déficit hídrico na cultura da cana-de-açúcar, amplamente relatados na literatura, estão relacionados ao aumento da perda de água dos tecidos, o que induz o estresse oxidativo e afeta os aspectos fisiológicos das plantas (DE CAMARGO et al., 2019; BEZERRA et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2020). Os resultados deste estudo revelaram que o déficit hídrico provocou nas plantas danos fisiológicos e bioquímicos. Estes danos são

decorrentes das alterações estequiométricas de C/Si, C/N e C/P, especialmente na ausência de adição de Si ($0,0 \text{ kg ha}^{-1}$) (Figuras 8 e 9).

Estudos recentes têm confirmado que o déficit hídrico provoca perdas nos parâmetros bioquímicos da cana-de-açúcar, modificando a estequiometria C:N:P devido a alterações nos teores de carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P) (DE OLIVEIRA FILHO et al., 2021a). Essas modificações impactam diretamente a homeostase estequiométrica elementar, resultando em uma menor eficiência no uso de nutrientes e na redução da produção de biomassa pelas plantas (TEIXEIRA et al., 2022; COSTA et al., 2022, 2023).

Os resultados deste estudo, confirmam esses achados, ao revelar que o déficit hídrico severo comprometeu a produção de biomassa das plantas durante as fases de perfilhamento e alongamento do colmo (Figura 11a, d). Esse efeito pode ser atribuído a uma redução na redistribuição de nutrientes, um fenômeno comumente observado em plantas sob deficiência hídrica (BROUDER; VOLENEC, 2008). O comprometimento na redistribuição de nutrientes, particularmente de macronutrientes essenciais, pode provocar um desequilíbrio nutricional, intensificando os efeitos adversos do déficit hídrico (TAIZ et al., 2017). Portanto, os resultados deste estudo corroboram com a hipótese de que o déficit hídrico, especialmente em fases críticas do desenvolvimento da cana-de-açúcar, compromete a produção da massa seca, devido a uma série de respostas fisiológicas e metabólicas nas plantas.

Avanços recentes nas pesquisas revelaram um novo benefício do Si em plantas de cana-de-açúcar cultivadas sob déficit hídrico, ao modificar a homeostase de C:N:P, otimizando a relação estequiométrica entre esses nutrientes e mitigando os danos bioquímicos causados por esse tipo de estresse (COSTA et al., 2024). Os resultados deste estudo mostraram que doses ótimas de Si reduziram os teores de C nas folhas e colmos das plantas (Figura 7a, b). Esses resultados estão em consonância com estudos anteriores realizados em cana-de-açúcar (TEIXEIRA et al., 2020, 2022; COSTA et al., 2022, 2023) e sorgo granífero (*Sorghum bicolor* L. Moench) fertilizados com Si (DE CARVALHO et al., 2022).

Esses achados sugerem que a incorporação de Si nos tecidos vegetais pode substituir parcialmente o carbono em compostos orgânicos da parede celular (NEU; SCHALLER; DUDEL, 2017), especialmente em espécies da família *Poaceae*, conhecidas por acumularem altos níveis de Si (KOVÁCS; KUTASY; CSAJBÓK, 2022). Essa substituição é relevante devido ao menor custo energético associado à incorporação de Si em comparação com compostos de carbono (SCHOELYNCK et al., 2010; DE CARVALHO et al., 2022).

A condição de déficit hídrico severo (20% da ETc) aumentou o teor de N nas folhas (Figura 7c, e). Pesquisas recentes têm relatado aumentos nos teores de N sob déficit hídrico

severo em cana-de-açúcar na ausência da aplicação de Si (COSTA et al., 2023), corroborando com os achados deste estudo. Esses resultados sugerem uma possível estratégia das plantas para atenuar o déficit hídrico, aumentando os níveis de prolina como estratégia em lidar com o déficit hídrico (TEIXEIRA et al., 2022). Assim, os resultados deste estudo indicam que, quando as plantas são cultivadas na condição de déficit hídrico severo (20% da ETc) por um período prolongado, a absorção de N não é limitada, e as plantas podem se ajustarem osmoticamente como estratégia de tolerância à seca.

A aplicação de Si em uma dose ótima resultou na diminuição dos teores de N nos colmos das plantas de cana-de-açúcar até a fase de alongamento dos colmos (Figura 7d, f). Costa et al. (2023) também observaram uma diminuição nos teores de N nos colmos com a aplicação de Si em cana-de-açúcar. A possível explicação para essa redução está associada à regulação negativa dos genes *OsAMT1;1* e *OsGS1;1*, que desempenham papéis cruciais na incorporação do N assimilado nas plantas (WU et al., 2017). Além disso, a diminuição dos teores de N nas plantas fertilizadas com Si pode estar relacionada ao efeito benéfico do elemento no equilíbrio hídrico das plantas (TEIXEIRA et al., 2022). Estudos anteriores indicam que a absorção de grandes quantidades de Si pelas plantas contribui para a manutenção do estado hídrico, devido à deposição de sílica associada à celulose na epiderme foliar e abaixo da cutícula (MITANI-UENO; MA, 2021). Essa deposição atua como uma barreira à perda de água, preservando a hidratação dos tecidos vegetais (VANDEGEER et al., 2021; CHERAGHI et al., 2024).

Os resultados deste estudo demonstram que, sob condições de 50 e 20% da ETc, as doses ótimas de Si contribuíram para a manutenção do potencial hídrico (Figura 5a) e favoreceram o ajustamento osmótico das plantas de cana-de-açúcar (Figura 5b), permitindo a preservação da turgidez celular. Esses achados sugerem que o manejo adequado de doses ótimas de Si pode melhorar a tolerância das plantas à seca, ajustando osmoticamente e otimizando o potencial hídrico foliar de acordo com os níveis de irrigação. Variedades que se ajustam osmoticamente podem manter taxas fotossintéticas mais altas sob déficit hídrico devido a um estado hídrico mais favorável, impactando na eficiência de uso da radiação, promovendo assim uma maior taxa de crescimento e produção de matéria seca (SUBBARAO et al., 2000).

O aumento do ajustamento osmótico observado neste estudo com a dose de Si de 85,0 kg ha⁻¹ (Figura 5b) indica que as plantas de cana-de-açúcar acumularam solutos celulares sob baixo potencial hídrico, especialmente na condição de 20% da ETc (Figura 5a). Esse ajustamento osmótico permitiu que as plantas extraíssem mais água do solo em condições de déficit hídrico severo. Esses resultados estão em consonância com estudos anteriores (SERRAJ; SINCLAIR, 2002), que demonstram que o ajustamento osmótico sustenta o rendimento das

plantas ao interagir com outras características fisiológicas sob condições de déficit hídrico, melhorando o crescimento e o desempenho das plantas (MAHMOOD et al., 2020).

Em relação ao teor de P, os resultados deste estudo mostraram que a aplicação de Si em uma dose ótima aumentou os teores de P nas folhas e colmos da cana-de-açúcar cultivada sob as condições de 50 e 20% da ETc (Figura 7g, h). Esses achados são consistentes com estudos anteriores que também observaram um aumento nos teores de P em folhas e colmos de cana-de-açúcar após a aplicação de Si (OLIVA et al., 2021; COSTA et al., 2023; 2022). O Si melhora a absorção de P ao estimular a biossíntese de exsudatos, como citrato e malato, que competem com o P por locais de adsorção no solo, ou formando complexos com Al e Fe, aumentando a disponibilidade de P na solução do solo (KOSTIC et al., 2017; PAVLOVIC et al., 2021). Outra explicação para a interação benéfica do Si com P, é que o ácido monossilícico pode competir com os fosfatos pelos locais de ligação nas superfícies minerais, promovendo maior mobilidade do P no solo e aumentando a disponibilidade de P para as plantas (COSTA et al., 2024; SCHALLER; PUPPE, 2023).

Os resultados deste estudo demonstraram que as alterações nos teores de C, N e P, influenciadas pelo uso do Si, afetaram as proporções desses nutrientes nas folhas e colmos das plantas de cana-de-açúcar sob ambas as condições de irrigação (50 e 20% da ETc) (Figura 8, 9). Esse efeito é significativo devido à influência do Si na absorção de nutrientes com função estrutural, como C, N e P (COSTA et al., 2022; DE OLIVEIRA FILHO et al., 2021a, 2021b; TEIXEIRA et al., 2020, 2022).

Avanços recentes demonstram que o fornecimento de Si influencia a relação Si:C:N:P, modificando a estequiometria do C, N e P, em plantas de cana-de-açúcar cultivadas sob condições de déficit hídrico (COSTA et al., 2024; IRFAN et al., 2023; TEIXEIRA et al., 2022). Alterações na estequiometria C:N:P em resposta ao uso de Si tem contribuído para um novo equilíbrio homeostático em plantas sob déficit hídrico, resultando no aumento da produção de massa seca (DE OLIVEIRA FILHO et al., 2021b TEIXEIRA et al., 2022; COSTA et al., 2022, 2023; DUTRA et al., 2023). Os resultados deste estudo corroboram esses achados, demonstrando um incremento na produção de massa seca em plantas de cana-de-açúcar que receberam doses ótimas de Si sob condições de déficit hídrico (Figura 11b, c, e). Esse efeito é atribuível à capacidade do Si de promover o equilíbrio na homeostase nutricional, um mecanismo crucial no metabolismo vegetal que permite a conversão de nutrientes em biomassa (ELSER; HAMILTON, 2007; DUTRA et al., 2023).

Este estudo, demonstrou que o uso de Si modificou a estequiometria de C:N:P. Isso foi evidenciado pela diminuição das razões C:Si (Figura 8a, b), C:P (Figura 9a, b) e N:P (Figura

9c, d) nas folhas e colmos e pelo aumento da razão estequiométrica C:N nas folhas (Figura 8d) das plantas de cana-de-açúcar. A redução da relação C:Si, provavelmente ocorreu porque as plantas utilizaram Si na formação de componentes da parede celular (FRAZÃO et al., 2020; OLIVERA-VICIEDO et al., 2024). As maiores unidades de Si por unidade de C (baixa relação C:Si) em plantas sob condições de estresse vêm sendo associadas aos mecanismos de mitigação do estresse pela ação do Si (OLIVERA-VICIEDO et al., 2024). Estudos anteriores confirmam que plantas sob déficit hídrico apresentaram uma correlação negativa entre C e Si, sugerindo uma possível substituição de C por Si, o que aumenta a massa seca das plantas (DE OLIVEIRA FILHO et al., 2021a; ROCHA; DE MELLO PRADO; DE CÁSSIA PICCOLO, 2022; TEIXEIRA et al., 2020).

Para as relações C:P e N:P, a diminuição está relacionada a um maior teor de P em relação ao C e ao N. Por outro lado, o aumento na proporção C:N está associado a um menor teor de N. As menores relações C:P e N:P nas folhas e colmos com as doses mínimas de Si observadas neste estudo indicam que os teores de Si nos tecidos da cana-de-açúcar contribuíram para manter o equilíbrio entre C e P em ambas as condições de irrigação (50 e 20% da ETc). Esse equilíbrio contribuiu para a homeostase e para a regulação das proporções de nutrientes nas folhas e colmos, favorecendo um aumento na quantidade de componentes estruturais ricos em C, com função metabólica em detrimento da função estrutural (TEIXEIRA et al., 2022).

Uma explicação para a redução na relação C:P provavelmente ocorreu devido a influência do Si na absorção de P, aumentando a disponibilidade desse nutriente, conforme evidenciado pelos valores observados nos tecidos foliares das plantas neste estudo (Figura 7g, h). De acordo com Olivera Viciedo et al. (2019) plantas podem ajustar suas demandas de nutrientes para manter a homeostase. A maior absorção de Si observada neste estudo, em plantas submetidas sob estresse severo (Figura 6b), contribuiu para a manutenção da homeostase e o equilíbrio das proporções de nutrientes nos tecidos foliares.

Neste estudo, os resultados mostraram que a condição de 20% da ETc de forma isolada diminuiu a relação C:N nas folhas das plantas de cana-de-açúcar (Figura 8c). Essa diminuição deve-se principalmente devido ao aumento do teor de N observado nas plantas sob a condição de maior restrição hídrica que não receberam Si. Esses resultados, estão em consonância com os encontrados para a espécie (TEIXEIRA et al., 2022). No entanto, neste estudo também ao avaliar o Si de forma isolada foi observado que esse elemento aumentou a relação C:N (Figura 8d), uma explicação para isso é que o Si pode promover a síntese de compostos orgânicos, como celulose e lignina, que contêm alto teor de C. Isso pode resultar em um aumento na relação C, pois mais carbono é incorporado na estrutura da planta (EPSTEIN, 1994)

Por outro lado, a relação C:N nos colmos das plantas de cana-de-açúcar que receberam doses ótimas de Si aumentou significativamente sob condições de déficit hídrico moderado (50% da ETc) em comparação ao déficit hídrico severo (20% da ETc) (Figura 8e). Esse efeito ocorreu principalmente devido a diminuição do teor N observado nas plantas nessa condição. Isso demonstra que o efeito do Si na relação C:N varia conforme a condição hídrica.

Esses achados reforçam, a capacidade do Si de modificar o equilíbrio homeostático de C:N em condições de déficit hídrico, resultado que também foi observado por Olivera Vicedo et al. (2019). Possivelmente, o Si exerce um efeito múltiplo sobre o metabolismo do N, embora os mecanismos exatos ainda não estejam totalmente esclarecidos. Novos estudos são necessários para compreender melhor como o Si altera o metabolismo do N, especialmente em relação à homeostase dos nutrientes (COSTA et al., 2023).

Neste estudo, doses ótimas de Si melhoraram a eficiência de uso do C (Figura 10a) e N (Figura 10b). Estudos anteriores confirmam que, de fato, o Si promove o aumento na eficiência do uso de C em plantas de cana-de-açúcar sob estresse hídrico (COSTA et al., 2022; FRAZÃO et al., 2020; TEIXEIRA et al., 2022). A maior eficiência de uso do C promovida pelo Si deve-se à maior incorporação de Si nos tecidos vegetais, sendo seu uso mais direcionado à fotossíntese do que a compostos estruturais (SCHALLER et al., 2012), à medida que o C é substituído pelo Si (HAO et al., 2020). O benefício do Si reside na sua capacidade de reduzir a demanda de C para produzir 1 g de matéria seca, reduzindo conseqüentemente o teor de C (COSTA et al., 2022; DE SOUZA JÚNIOR et al., 2022; TEIXEIRA et al., 2020). De acordo com Costa et al. (2023) a biossíntese de massa seca em cana-de-açúcar está completamente relacionada ao aumento da eficiência do uso de C.

Isso ocorre porque o Si é imobilizado nas paredes celulares na forma de fitólitos (SCHOELYNCK et al., 2010). Essa substituição é biologicamente interessante porque o custo energético (em termos de NADPH e ATP) para incorporação o Si em compostos estruturais é 50 vezes menor do que para compostos orgânicos, devido à alta permeabilidade intrínseca nas bicamadas lipídicas (HAO et al., 2020; TEIXEIRA et al., 2022). Isto torna-se uma vantagem competitiva induzida pelo Si, pois acaba sendo uma estratégia de baixo custo energético para as plantas (KLOTZBÜCHER et al., 2018; SCHALLER; BRACKHAGE; DUDEL, 2012). Portanto, as plantas de cana-de-açúcar podem direcionar energia para otimizar o metabolismo de defesa contra o déficit hídrico, melhorando a fotossíntese com a alteração da estequiometria C:N:P (PAVLOVIC et al., 2021; TEIXEIRA et al., 2022).

Os resultados deste estudo mostraram que na dosagem ótima de Si ocorreu um aumento da eficiência do uso de N, provavelmente atribuído ao aumento da eficiência fotossintética.

Esses achados estão em consonância com estudos anteriores ao verificarem que a eficiência do uso do N foi melhorada pelo Si, de tal forma que aumentou a fotossíntese líquida em cana-de-açúcar (CAMARGO et al., 2023; BOKHTIAR et al., 2012; VERMA et al., 2020, 2021) e melhorou a produção de biomassa em *Triticum aestivum* L. (NEU; SCHALLER; DUDEL, 2017). Além disso, a melhoria na eficiência do uso de N pela aplicação de Si pode ser atribuída a uma alteração no metabolismo de aminoácidos, que estimula a remobilização de N, principalmente na forma de aminoácidos, dos reservatórios de armazenamento para os tecidos em crescimento (DETMANN et al., 2012). No entanto, os mecanismos exatos pelos quais o Si induz alterações no metabolismo do N ainda não são completamente compreendidos (PAVLOVIC et al., 2021).

Pode-se aceitar a hipótese de que o fornecimento de Si a partir da fonte de sílica amorfa altera a dinâmica de absorção de C, N e P, otimizando a eficiência no uso de C e N e reduzindo a perda de biomassa vegetal em cana-de-açúcar. Esse achado possui implicações práticas relevantes, pois pode incentivar o uso do Si em cultivos irrigados de cana-de-açúcar, considerando a baixa quantidade de Si empregada em comparação a outras fontes de menor solubilidade, como o silicato de cálcio, que requer doses de até 1000 kg ha⁻¹ (CAMARGO et al., 2021, 2023).

A redução na eficiência de uso do P neste estudo (Figura 10d) ocorreu provavelmente devido ao aumento dos teores de P nas folhas e colmos (Figura 7g, h). De acordo com estudos recentes a adubação com Si na cana-de-açúcar altera as relações estequiométricas (C:P, N:P e C:Si), com concentrações reduzidas de C associadas ao aumento da utilização de P e produção de biomassa (DUTRA et al., 2023). Desta forma, uma alta exigência por P pode levar a um uso menos eficiente ou a uma redistribuição do P dentro da planta. Uma possível explicação para isso é que o Si entra em competição direta com o P pelos locais de sorção de óxidos de ferro e outros minerais do solo, aumentando a mobilização de nutrientes e aumentando a biodisponibilidade potencial para as plantas (SCHALLER et al., 2020). No entanto, evidências experimentais a nível molecular ou proteico são limitadas, indicando a necessidade de mais pesquisas para entender como o Si influencia a absorção de P em plantas (PAVLOVIC et al., 2021).

Este estudo esclareceu os possíveis mecanismos pelos quais o Si atua na cana-de-açúcar cultivada sob déficit hídrico, indicando o estabelecimento de um novo equilíbrio homeostático C:N:P responsável por aumentar a eficiência de uso de C e proporcionar maior produção de massa seca dos colmos. Tal efeito, é confirmado pela análise multivariada (agrupamento hierárquico), indicando que a combinação de 50% da ETc com a dose de 78 kg ha⁻¹ de Si

aumentou a produção de massa seca nos colmos de cana-de-açúcar (Figuras 12b). Este resultado é significativo pois uma alta produção de massa seca nos colmos está diretamente relacionada à produtividade da planta, uma vez que os colmos são a principal parte utilizada para a extração de açúcar e outros produtos derivados.

5. CONCLUSÕES

O estudo demonstra que o Si na forma de sílica amorfa melhora as relações hídricas das plantas, ao manter o potencial hídrico e promover o ajuste osmótico, o que contribui para uma maior tolerância da cana-de-açúcar ao déficit hídrico.

A aplicação de 78,0 kg ha⁻¹ de Si, equivalente a 300,0 kg ha⁻¹ de sílica amorfa, mostrou ser eficaz em aumentar a eficiência de uso do C e proporcionar maior produção de massa seca dos colmos em condições de déficit hídrico moderado.

Os resultados deste estudo demonstram o potencial do fertilizante à base de sílica amorfa na resposta das plantas de cana-de-açúcar à aplicação de Si. No entanto, essa resposta é dependente da dose de Si utilizada para a otimização da eficiência nutricional na cana-de-açúcar. Dada as variações observadas nos teores de nutrientes nos tecidos vegetais, recomenda-se a realização de ensaios adicionais para validar o uso de uma dose ótima de Si em condições de campo.

6. REFERÊNCIAS

- ASGARI, F. et al. Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 127, p. 152-160, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.021>
- BATAGLIA, O. C. et al. Métodos de análise química de plantas. **Boletim Técnico-Instituto Agrônomico** (Brazil). no. 78., 1983.
- BESHARAT, S.; BARÃO, L.; CRUZ, C. New strategies to overcome water limitation in cultivated maize: Results from sub-surface irrigation and silicon fertilization. **Journal of Environmental Management**, v. 263, p. 110398, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110398>
- BEZERRA, B. K. L. et al. Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta physiologiae plantarum**, v. 41, p. 1–12, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>
- BLUM, A. Osmotic adjustment and growth of barley genotypes under drought stress. **Crop Science**, v.29, n. 1, p. 230-233, 1989. <https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900010052x>

- BOKHTIAR, S. M. et al. 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, n. 8, p. 1255-1275, 2012. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.676379>
- BOKHTIAR, S. M. et al. 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, n. 8, p. 1255-1275, 2012. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.676379>
- BROUDER, S. M.; VOLENEC, J. J. Impact of climate change on crop nutrient and water use efficiencies. **Physiologia Plantarum**, v. 133, n. 4, p. 705–724, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01136.x>
- CAMARGO, M. S. et al. Silicon Fertilization in Sugarcane Drought-Contrasting Cultivars Subjected to Water Deficit at the Ripening Phase. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 3, p. 3209–3218, 1 set. 2023. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01303-6>
- CAMARGO, M. S. et al. 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**, v. 466, p. 581-595, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05063-z>
- CHERAGHI, M. et al. Application of silicon improves rhizosheath formation, morpho-physiological and biochemical responses of wheat under drought stress. **Plant and Soil**, p. 1-19, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06584-z>
- COSTA, M. G. et al. 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, 29 jul. 2022. <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. 1, 1 dez. 2023. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04077-2>
- COSTA, M. G. et al. The effect of abiotic stresses on plant C:N:P homeostasis and their mitigation by silicon. **The Crop Journal**, v. 12, n. 2, p. 340–353, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.11.012>
- CRUSCIOL, C. A. C. et al. Effects of surface application of calcium-magnesium silicate and gypsum on soil fertility and sugarcane yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1843-1854, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000600019>
- DA SILVA, W. R. et al. Assessing human health risks and strategies for phytoremediation in soils contaminated with As, Cd, Pb, and Zn by slag disposal. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 144, p. 522-530, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.068>
- DE CAMARGO, M. S. et al. Silicon Fertilization Improves Physiological Responses in Sugarcane Cultivars Grown Under Water Deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, n. 1, p. 81–91, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>
- DE CARVALHO, J. S. et al. Silicon modifies C: N: P stoichiometry and improves the physiological efficiency and dry matter mass production of sorghum grown under nutritional sufficiency. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 16082, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20662-1>
- DE CARVALHO, J. S. et al. Silicon modifies C:N:P stoichiometry and improves the physiological efficiency and dry matter mass production of sorghum grown under nutritional sufficiency. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 16082, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20662-1>

- DE OLIVEIRA FILHO, A. S. B. et al. 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**, v. 255, 1 set. 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107006>
- DE OLIVEIRA FILHO, A. S. B. et al. Water deficit modifies C:N:P stoichiometry affecting sugarcane and energy cane yield and its relationships with silicon supply. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 20916, 2021a. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00441-0>
- DE SOUZA JÚNIOR, J. P. et al. Analyzing the Role of Silicon in Leaf C:N:P Stoichiometry and Its Effects on Nutritional Efficiency and Dry Weight Production in Two Sugarcane Cultivars. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 2, p. 2687–2694, 1 jun. 2022. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00836-6>
- DE WRACHIEN, D.; SCHULTZ, B.; GOLI, M. B. Impacts of population growth and climate change on food production and irrigation and drainage needs: A world-wide view. **Irrigation and Drainage**, v. 70, n. 5, p. 981–995, 2021. <https://doi.org/10.1002/ird.2597>
- DETMANN, K. C. et al. Silicon nutrition increases grain yield, which, in turn, exerts a feed-forward stimulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. *New Phytologist*, v. 196, n. 3, p. 752–762, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04299.x>
- DINH, T. H. et al. Photosynthetic response and nitrogen use efficiency of sugarcane under drought stress conditions with different nitrogen application levels. **Plant Production Science**, v. 20, n. 4, p. 412–422, 2017. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2017.1371570>
- DO NASCIMENTO, C. W. A. et al. Efficiency and recovery index of silicon of a diatomaceous Earth-based fertilizer in two soil types grown with sugarcane and maize. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 16, p. 2347–2358, 2021. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1918157>
- DUTRA, A. F. et al. Soil and foliar Si fertilization alters elemental stoichiometry and increases yield of sugarcane cultivars. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, 1 dez. 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43351-z>
- ELLERBROCK, R.; STEIN, M.; SCHALLER, J. Comparing amorphous silica, short-range-ordered silicates and silicic acid species by FTIR. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, 1 dez. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15882-4>
- ELSER, J. J.; HAMILTON, A. **Stoichiometry and the new biology: The future is now. PLoS Biology**, jul. 2007. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0050181>
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. (5ª ed), revisada e ampliada. Brasília, DF, Embrapa Solos, 2018, p. 117.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solo, plantas e fertilizantes**. ed. téc. Fábio Cesar da Silva. 2ª ed. revista e ampliada - Embrapa Informação Tecnológica. 627 p. Brasília, DF: 2009.
- EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 91, n. 1, p. 11–17, 1994. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>
- FAO (2021) **The agricultural production indices**. Food and Agricultural Organisation of the United Nations. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: jan. de 2024.

- FERREIRA, T. H. S. et al. **Sugarcane water stress tolerance mechanisms and its implications on developing biotechnology solutions.** *Frontiers in Plant Science* Frontiers Media S.A., , 23 jun. 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01077>
- FRAYSSE, F. et al. Surface chemistry and reactivity of plant phytoliths in aqueous solutions. *Chemical Geology*, v. 258, n. 3–4, p. 197–206, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.003>
- FRAZÃO, J. J. et al. Silicon changes C:N:P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 12492, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69310-6>
- GARCIA, F. H. S. et al. Water deficit tolerance in sugarcane is dependent on the accumulation of sugar in the leaf. *Annals of Applied Biology*, v. 176, n. 1, p. 65–74, 2020. <https://doi.org/10.1111/aab.12559>
- GONZALEZ-PORRAS, C. V. et al. Silicon via fertigation with and without potassium application, improve physiological aspects of common beans cultivated under three water regimes in field. *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, 1 dez. 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52503-8>
- HAO, Q. et al. Silicon Affects Plant Stoichiometry and Accumulation of C, N, and P in Grasslands. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, 27 ago. 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01304>
- HARVEY, J. T.; LEFFLER, A. J. Differential stoichiometric homeostasis and growth in two native and two invasive C3 grasses. *Oecologia*, v. 193, n. 4, p. 857–865, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00442-020-04734-5>
- IRFAN, M. et al. **Silicon Nutrition in Plants under Water-Deficit Conditions: Overview and Prospects.** *Water (Switzerland)*MDPI, , 1 fev. 2023. <https://doi.org/10.3390/w15040739>
- KATZ, O. et al. Silicon in the soil–plant continuum: Intricate feedback mechanisms within ecosystems. *Plants*, v. 10, n. 4, p. 652, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10040652>
- KEEPING, M. G. Uptake of silicon by sugarcane from applied sources may not reflect plant-available soil silicon and total silicon content of sources. *Frontiers in Plant Science*, v. 8, p. 245515, 2017c. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00760>
- KEEPING, M. G.; MEYER, J. H.; SEWPERSAD, C. Soil silicon amendments increase resistance of sugarcane to stalk borer *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae) under field conditions. *Plant and Soil*, v. 363, p. 297-318, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1325-1>
- KEEPING, M. G.; MILES, N; RUTHERFORD, R. Stuart. Liming an acid soil treated with diverse silicon sources: effects on silicon uptake by sugarcane (*Saccharum* spp. hybrids). *Journal of plant nutrition*, v. 40, n. 10, p. 1417-1436, 2017d. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1267751>
- KLOTZBÜCHER, T. et al. Variable silicon accumulation in plants affects terrestrial carbon cycling by controlling lignin synthesis. *Global Change Biology*, v. 24, n. 1, p. e183–e189, 2018. <https://doi.org/10.1111/gcb.13845>
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. **Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods**, v. 5, p. 635-662, 1986. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>
- KORNDÖRFER, G. H., PEREIRA, H. S., NOLLA, A. **Análise de silício no solo, planta e fertilizantes.** (UFU, 2004).
- KOSTIC, L. et al. Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. *Plant and Soil*, v. 419, n. 1–2, p. 447–455, 1 out. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3364-0>

KOVÁCS, S.; KUTASY, E.; CSAJBÓK, J. **The Multiple Role of Silicon Nutrition in Alleviating Environmental Stresses in Sustainable Crop Production.** *PlantsMDPI*, 1 maio 2022.

<https://doi.org/10.3390/plants11091223>

KRASKA, J. E.; BREITENBECK, G. A. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 41, n. 17, p. 2075-2085, 2010.

<https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>

LAKSHMANAN, P.; ROBINSON, N. Stress physiology: Abiotic stresses. **Sugarcane: Physiology, biochemistry, and functional biology**, p. 411-434, 2013.

<https://doi.org/10.1002/9781118771280.ch16>

MA, J. F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan.** Elsevier, 2002

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in plant science**, v. 11, n. 8, p. 392-397, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>

MAHMOOD, T. et al. Incredible role of osmotic adjustment in grain yield sustainability under water scarcity conditions in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plants**, v. 9, n. 9, p. 1208, 2020.

<https://doi.org/10.3390/plants9091208>

MERRIAM, J. L., Keller, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management.** Logan: Utah State University, 1978. <https://agris.fao.org/agrissearch/search.do?recordID=XF2016027644>

MITANI-UENO, N.; MA, J. F. Linking transport system of silicon with its accumulation in different plant species. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 67, n. 1, p. 10-17, 2021.

<https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1845972>

NEU, S.; SCHALLER, J.; DUDEL, E. G. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports**, v. 7, 17 jan. 2017. <https://doi.org/10.1038/srep40829>

NEU, S.; SCHALLER, J.; DUDEL, E. G. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C: N: P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 40829, 2017. <https://doi.org/10.1038/srep40829>

OLIVA, K. M. E. et al. Amorphous Silica-Based Fertilizer Increases Stalks and Sugar Yield and Resistance to Stalk Borer in Sugarcane Grown Under Field Conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 3, p. 2518-2529, 1 set. 2021. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00543-8>

OLIVA, K. M. E. et al. Biomass and concentration of nutrients and silicon in sugarcane grown on soil fertilized with diatomite. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 4, p. 1-7, 2020.

<https://doi.org/10.5039/agraria.v15i4a8755>

OLIVERA VICIEDO, D. et al. Short-term warming and water stress affect *Panicum maximum* Jacq. stoichiometric homeostasis and biomass production. **Science of The Total Environment**, v. 681, p. 267-274, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.108>

OLIVERA-VICIEDO, D. et al. Silicon uptake and utilization on *Panicum maximum* grass modifies C:N:P stoichiometry under warming and soil water deficit. **Soil and Tillage Research**, v. 235, p. 105884, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105884>

PAVLOVIC, J. et al. **Interactions of Silicon With Essential and Beneficial Elements in Plants.** *Frontiers in Plant Science* Frontiers Media S.A., 23 jun. 2021.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697592>

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 28 maio 2024.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. 2022.

ROCHA, J. R.; DE MELLO PRADO, R.; DE CÁSSIA PICCOLO, M. New outcomes on how silicon enables the cultivation of *Panicum maximum* in soil with water restriction. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, 1 dez. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05927-z>

SCHALLER, J. et al. Amorphous Silica Controls Water Storage Capacity and Phosphorus Mobility in Soils. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, 3 jul. 2020. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00094>

SCHALLER, J. et al. Silica fertilization improved wheat performance and increased phosphorus concentrations during drought at the field scale. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 1 dez. 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00464-7>

SCHALLER, J. et al. Silicon supply modifies C: N: P stoichiometry and growth of *Phragmites australis*. **Plant Biology**, v. 14, n. 2, p. 392–396, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2011.00537.x>

SCHALLER, J.; BRACKHAGE, C.; DUDEL, E. G. Silicon availability changes structural carbon ratio and phenol content of grasses. **Environmental and Experimental Botany**, v. 77, p. 283–287, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.12.009>

SCHALLER, J.; PUPPE, D. Silicon Biogeochemistry in Terrestrial Ecosystems. Em: **Benefits of Silicon in the Nutrition of Plants**. [s.l.] Springer, 2023. p. 1–16. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26673-7_1

SCHOELYNCK, J. et al. Silica uptake in aquatic and wetland macrophytes: a strategic choice between silica, lignin and cellulose?. **New Phytologist**, v. 186, n. 2, p. 385–391, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03176.x>

SCHOELYNCK, J. et al. Silica uptake in aquatic and wetland macrophytes: a strategic choice between silica, lignin and cellulose? **New Phytologist**, v. 186, n. 2, p. 385–391, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03176.x>

SERRAJ, RACHID; SINCLAIR, T. R. Osmolyte accumulation: can it really help increase crop yield under drought conditions?. **Plant, cell & environment**, v. 25, n. 2, p. 333–341, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00754.x>

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of plant nutrition**, v. 4, n. 3, p. 289–302, 1981. <https://doi.org/10.1080/01904168109362919>

SUBBARAO, G. V. et al. Osmotic adjustment, water relations and carbohydrate remobilization in pigeonpea under water deficits. **Journal of Plant Physiology**, v. 157, n. 6, p. 651–659, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(00\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(00)80008-5)

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TEDESCO, M. J. et al. Análise de solo, plantas e outros materiais (Analysis of soil, plants and other materials). **Boletim técnico**, v. 5, p. 174, 1995.

TEIXEIRA, G. C. M. et al. 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**, v. 15, n. 10 October, 1 out. 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240847>

TEIXEIRA, G. C. M. et al. Silicon as a Sustainable Option to Increase Biomass With Less Water by Inducing Carbon:Nitrogen:Phosphorus Stoichiometric Homeostasis in Sugarcane and Energy Cane. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 12 abr. 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.826512>

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise do solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017, 573 p

VANDEGEER, R. K. et al. Silicon deposition on guard cells increases stomatal sensitivity as mediated by K⁺ efflux and consequently reduces stomatal conductance. **Physiologia Plantarum**, v. 171, n. 3, p. 358-370, 2021. <https://doi.org/10.1111/ppl.13202>

VERMA, K. K. et al. Foliar application of silicon boosts growth, photosynthetic leaf gas exchange, antioxidative response and resistance to limited water irrigation in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 582–592, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.032>

VERMA, K. K. et al. The Impact of Silicon on Photosynthetic and Biochemical Responses of Sugarcane under Different Soil Moisture Levels. **Silicon**, v. 12, n. 6, p. 1355–1367, 1 jun. 2020. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00228-z>

WU, X. et al. Interactions between nitrogen and silicon in rice and their effects on resistance toward the brown planthopper *Nilaparvata lugens*. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 23 jan. 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00028>