

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FERTIRRIGAÇÃO E PULVERIZAÇÃO FOLIAR COM SILÍCIO  
EM CANA-DE-AÇÚCAR E EM CANA-ENERGIA CULTIVADA  
SOB DÉFICIT HÍDRICO**

**Gelza Carliane Marques Teixeira**

Engenheira Agrônoma

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FERTIRRIGAÇÃO E PULVERIZAÇÃO FOLIAR COM SILÍCIO  
EM CANA-DE-AÇÚCAR E EM CANA-ENERGIA CULTIVADA  
SOB DÉFICIT HÍDRICO**

**Gelza Carliane Marques Teixeira**

**Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado**

**Coorientadora: Profa. Dra. Priscila Lupino Gratão**

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

T266f

Teixeira, Gelza Carliane Marques

Fertirrigação e pulverização foliar com silício em cana-de-açúcar e em cana-energia cultivada sob déficit hídrico / Gelza Carliane Marques  
Teixeira. -- Jaboticabal, 2021

145 p. : il.

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

Orientador: Renado de Mello Prado

Coorientadora: Priscila Lupino Gratão

1. nutrição de plantas. 2. elemento benéfico. 3. Saccharum  
officinatum L.. 4. Saccharum spontaneum L.. 5. uso da água. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**


TÍTULO DA TESE: FERTIRRIGAÇÃO E PULVERIZAÇÃO FOLIAR COM SILÍCIO EM CANA-DE-AÇÚCAR E EM CANA-ENERGIA CULTIVADA SOB DÉFICIT HÍDRICO

**AUTORA: GELZA CARLIANE MARQUES TEIXEIRA**

**ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO**

**COORIENTADORA: PRISCILA LUPINO GRATÃO**

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

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

  
Prof. Dr. MANOEL EVARISTO FERREIRA (Participação Virtual)  
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dr. CÂSSIO HAMILTON ABREU JUNIOR (Participação Virtual)  
Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas / Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP

  
Prof. Dr. LUIZ FABIANO PALARETTI (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas (DECEX) / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dr. RAFAEL FERREIRA BARRETO (Participação Virtual)  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul/UFMS / Chapadão do Sul/MS

Jaboticabal, 31 de agosto de 2021

## **DADOS CURRICULARES DA AUTORA**

**GELZA CARLIANE MARQUES TEIXEIRA**, nascida em Imperatriz – MA, Brasil, em 11 de agosto de 1994, filha de Elza Marques Teixeira. Possui título de Técnica em Agropecuária (2011) e Engenheira Agrônoma (2016) pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – Câmpus Araguatins. Durante a graduação, foi bolsista de iniciação científica no período de 2013 a 2016, realizando pesquisas na área de produção vegetal e fertilidade de solo. Participou de projetos de extensão e programas de iniciação à docência como monitora de Química. Em agosto de 2018, obteve o título de Mestra em Agronomia pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo), na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), Câmpus de Jaboticabal, sob orientação do Prof. Dr. Renato de Mello Prado. Durante o mestrado, participou de uma missão de estudos na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), pelo Programa de Cooperação Acadêmica (Procad). Ainda em agosto de 2018, iniciou o curso de Doutorado pelo mesmo programa de Pós-graduação na Unesp/FCAV, desenvolvendo pesquisas sobre o uso do silício aplicado via fertirrigação na mitigação de estresses abióticos, com foco na deficiência hídrica. Durante o doutorado também atuou como docente-voluntário da UFMS, coorientou alunos em pesquisas vinculadas a Unesp e a empresas privadas, participou de diversas bancas de defesa de trabalho de conclusão de curso e publicou artigos em revistas de alto impacto. Atualmente, é membra do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da Unesp (Genplant).

Nada te perturbe, nada te espante,  
Tudo passa, Deus não muda,  
A paciência tudo alcança,  
Quem a Deus tem, nada falta,  
Só Deus basta.  
(Santa Teresa D'Ávila)

Dedico a minha mãe (avó materna), Maria do Carmo Teixeira (*in memoriam*), que está comigo todos os dias e que me fez ser quem eu sou. Vou lembrar eternamente do teu carinho, mãe.

**Dedico**

## **Agradecimentos**

Agradeço ao bondoso Deus por ter me ajudado a manter a fé durante toda a minha jornada na Pós-graduação. Agradeço também a toda minha família que mesmo longe, sempre foi a minha maior motivação para enfrentar as dificuldades, em especial os meus irmãos(as) e sobrinhos(as), que eu desejo e luto para que tenham oportunidades semelhantes ou melhores as que eu tive.

Eu não sei muito bem por qual motivo, mas sempre me neguei a enfrentar o destino preestabelecido para uma criança pobre, negra, filha de mãe solo que sempre morou na periferia, na simplicidade de uma família de maranhenses que nunca tiveram grandes oportunidades. Essa resistência tem me custado muitos esforços, no entanto, pela misericórdia divina sempre fui muito abençoada e Deus tem demonstrado todo o seu amor me permitindo provar de sentimentos afetuosos de carinho, amor e admiração, que considero os principais combustíveis para impulsionar um cidadão que possui a ambição de mudar a sua condição atual.

O doutorado foi uma fase de muita dificuldade, mas também de muito crescimento pessoal e profissional. Essa trajetória foi marcada pela grande oportunidade que tive em ser aluna do meu orientador Prof. Renato de Mello Prado, que sempre foi muito preocupado com o meu aprendizado e esteve inteiramente disponível para me ensinar. Prof., saiba que tenho um profundo respeito e admiração pelo Sr. e que sou imensamente grata por toda a paciência que teve comigo ao longo da minha formação durante o mestrado e o doutorado. Tenho certeza que eu não teria saído da Unesp como o mesmo aprendizado e com as mesmas oportunidades sem a sua colaboração.

Agradeço também a pessoa que sempre trabalhou ao meu lado durante todo o meu mestrado e doutorado, que foi o meu noivo Antonio Márcio Souza Rocha. Sem a sua ajuda, companhia, sem o seu carinho, amor e sem a dedicação que sempre teve ao nosso relacionamento eu não teria chegado até aqui. Sou imensamente grata a você e peço todos os dias que Deus nos abençoe e que possamos formar uma família muito feliz. Eu te amo demais e muitíssimo obrigada por estar sempre comigo.

Agradeço aos amigos que tive a oportunidade de conhecer através da Unesp, como Marcilene, Joel, Leandra, Miquéias, Michael, Núbia, Diego, Jhonathan, Gabi e Thayane que de maneira indireta e muito diretamente me ajudaram durante essa fase. Agradeço aos amigos e colegas do grupo Genplant (Grupo de Estudos em Nutrição de plantas da Unesp), Mariana, Lucas, Lívia, Luís, Ian, Rafael, Antonio Santana, Antonio Bulchet, Juan, Jonas e Kamilla pelas trocas de conhecimento e as colaborações e por todos os momentos de descontração vividos.

Agradeço ao antigo departamento de Solos e Adubos (atual Ciências da Produção Agrícola) e todos os funcionários que me ajudaram, em especial Adalto, Mauro e Tatiana. Agradeço profundamente as técnicas dos laboratórios de Nutrição de Plantas e Fisiologia Vegetal, Claudinha e Soninha, respectivamente, pela paciência e colaboração durante as análises dos experimentos. Agradeço também, aos funcionários da fazenda da Unesp, em nome do Marcelo (*in memoriam*) por ter me ajudado nas inúmeras vezes que precisei.

Também serei eternamente grata aos professores que tive durante a pós-graduação, como Prof. Arthur Bernardes, Prof. Pedro Luis, Profa. Mara Cristina, Prof. Rinaldo de Paula, Profa. Durvalina, Prof. Fabiano Palaretti, Prof. Wanderley de Melo, Prof. Rouverson, Prof. Itamar Andrioli e Profa. Carolina Fernandes que me ajudaram em disciplinas cursadas durante o mestrado e doutorado e/ou durante a realização de análises nos experimentos que desenvolvi. Agradeço de maneira especial a Profa. Mara que além de professora também foi um exemplo de vida para mim. Também sou grata a minha coorientadora, Profa. Priscila Lupino Gratão, por toda a paciência, receptividade e colaboração ao meu projeto e na minha formação.

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

A todos, abrigada!

## SUMÁRIO

RESUMO.....	iii
ABSTRACT .....	iv
CAPÍTULO 1 - Considerações gerais.....	1
1 Introdução .....	1
2 Revisão de literatura .....	4
2.1 Cultivo de cana-de-açúcar e de cana-energia .....	4
2.2 Cana-de-açúcar cultivada em sistema irrigado .....	6
2.3 Danos causados pelo déficit hídrico em cana-de-açúcar e cana-energia.....	8
2.4 Silício na mitigação dos danos causados pelo déficit hídrico em cana-de-açúcar e cana-energia .....	10
2.5 Fertirrigação e pulverização foliar com silício .....	14
3. Referências.....	16
CAPÍTULO 2 - Efeito benéfico do silício aplicado via fertirrigação atenua danos causados pelo déficit hídrico na cana-de-açúcar e na cana-energia.....	25
RESUMO .....	25
ABSTRACT .....	26
1 Introdução .....	27
2 Material e métodos.....	29
2.1 Material vegetal e condições de crescimento .....	29
2.2 Tratamentos e delineamento experimental.....	30
2.3 Parâmetros avaliados .....	32
2.4 Análise estatística .....	35
3 Resultados .....	35
4 Discussão .....	47
5 Conclusão .....	54
6 Referências.....	54
CAPÍTULO 3 - Nutrição silicatada e seus mecanismos biológicos envolvidos para a eficiência do uso da água em cultivos da cana-de-açúcar e da cana-energia sob déficit hídrico .....	61
RESUMO .....	61
ABSTRACT .....	62
1 Introdução .....	63
2 Material e métodos.....	66
2.1 Material vegetal e condições de crescimento .....	66

2.2 Tratamentos e delineamento experimental.....	67
2.3 Parâmetros avaliados .....	71
2.4 Análise estatística .....	75
3 Resultados .....	76
4 Discussão .....	90
5 Conclusão .....	99
6 Referências.....	99
CAPÍTULO 4 – Acúmulo de Si prolonga a mitigação do déficit hídrico em cana-de-açúcar e em cana-energia por modificar estequiometria Si:C:N:P e incrementar a eficiência nutricional .....	108
RESUMO .....	108
ABSTRACT .....	109
1 Introdução .....	110
2 Material e métodos.....	113
2.1 Material vegetal e condições de crescimento .....	113
2.2 Tratamentos e delineamento experimental.....	113
2.3 Parâmetros avaliados .....	117
2.4 Análise estatística .....	118
3. Resultados .....	119
4 Discussão .....	130
5 Conclusão .....	139
6 Referências.....	140

## FERTIRRIGAÇÃO E PULVERIZAÇÃO FOLIAR COM SILÍCIO EM CANA-DE-AÇÚCAR E EM CANA-ENERGIA CULTIVADA SOB DÉFICIT HÍDRICO

**RESUMO** - O cultivo irrigado de cana-de-açúcar e de cana-energia tem expandido nos últimos anos. Contudo, ao mesmo tempo tem ocorrido intensificação da restrição hídrica causada pelas mudanças climáticas. Por isso, é primordial pesquisas focadas em aumentar a tolerância dessas espécies de grande interesse agrícola, permitindo o uso da água com sustentabilidade. O fornecimento de silício (Si) pode contribuir para aumentar a eficiência no uso da água atenuando os danos causados pelo déficit hídrico. Mas não se conhece os efeitos do Si no cultivo de plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia sob déficit hídrico com duração de 7 até 60 ou 160 dias após o transplantio. Além disso, exige-se um aprimoramento da técnica de aplicação. Essa pesquisa foi realizada objetivando avaliar os efeitos da aplicação de Si via fertirrigação associada com a pulverização foliar em parâmetros fisiológicos, bioquímicos e nutricionais em plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia cultivadas sob déficit hídrico severo de dois períodos de duração. Foram realizados quatro experimentos em condição controlada. Inicialmente, foi avaliado o efeito da fertirrigação associada com pulverização foliar de Si aplicada somente na fase de formação de mudas em plantas de cana-de-açúcar (experimento I) e de cana-energia (experimento II) cultivadas sob déficit hídrico severo por período de 7 a 60 dias após o transplantio. Posteriormente, avaliou-se o efeito do Si nos mesmos modos de aplicação na fase de mudas e com complemento após o transplantio em plantas de cana-de-açúcar (experimento III) e de cana-energia (experimento IV) cultivadas sob déficit hídrico severo por período de 7 a 160 dias após o transplantio. O déficit hídrico severo diminuiu o conteúdo de água e o potencial hídrico das plantas, induzindo estresse oxidativo e prejudicando as trocas gasosas e a eficiência fotossintética com consequente diminuição da homeostase nutricional e do crescimento das plantas em ambos os períodos de duração. A aplicação de Si via fertirrigação e foliar foi eficiente e permitiu obter efeitos benéficos usando baixas doses do elemento. O fornecimento de Si via fertirrigação associado com a pulverização foliar apenas da fase de formação das mudas promoveu acúmulo suficiente para mitigar os efeitos causados pelo déficit hídrico por período de 7 até 60 dias após o transplantio, por meio da modulação do sistema antioxidante, favorecendo o metabolismo fisiológico, principalmente, na cana-de-açúcar. As aplicações de Si complementares após o transplantio causaram efeito benéfico em parâmetros fisiológicos e bioquímicos diminuindo os danos causados pelo déficit hídrico por período de 7 até 160 dias após o transplantio em ambas as espécies. O Si também modificou a relação C:N:P e aumentou a eficiência de uso de C, N e P em plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia sob déficit hídrico por ambos os períodos. Espera-se que o Si seja amplamente utilizado nos sistemas de produção da cana-de-açúcar e da cana-energia para manter o suprimento global das necessidades de bioenergia presentes e futuras, mas com sustentabilidade hídrica.

**Palavras-chave:** nutrição de plantas, elemento benéfico, *Saccharum officinarum* L., *Saccharum spontaneum* L., uso da água

## FERTIRRIGATION AND FOLIAR SPRAYING WITH SILICON ON SUGARCANE AND ON ENERGY CANE CULTIVATED UNDER WATER DEFICIT

**ABSTRACT** – The irrigated cultivation of sugarcane and energy cane has expanded in recent years. However, at the same time there has been an intensification of water restriction caused by climate change. Therefore, research focused on increasing the tolerance of these species of great agricultural interest, allowing the sustainable use of water, is essential. The supply of silicon (Si) can contribute to increase the efficiency of water use, mitigating the damage caused by the water deficit. But the effects of Si on the cultivation of sugarcane and energy cane plants under water deficit for 7 to 60 or 160 days after transplanting are not known. Furthermore, an improvement in the application technique is required. This research was carried out aiming to evaluate the effects of Si application via fertigation associated with foliar spraying on physiological, biochemical and nutritional parameters in sugarcane and energy cane plants cultivated under severe water deficit for two periods of duration. Four experiments were carried out in a controlled condition. Initially, the effect of fertigation associated with Si foliar spraying applied only in the seedling formation phase in sugarcane (experiment I) and energy cane (experiment II) plants cultivated under severe water deficit for a period was evaluated 7 to 60 days after transplantation. Subsequently, the effect of Si was evaluated in the same modes of application in the seedling stage and with complement after transplanting in sugarcane (experiment III) and energy cane (experiment IV) plants cultivated under severe water deficit for a period of 7 to 160 days after transplantation. The severe water deficit reduced the water content and water potential of plants, inducing oxidative stress and impairing gas exchange and photosynthetic efficiency, with a consequent decrease in nutritional homeostasis and plant growth in both duration periods. The application of Si via fertigation and foliar was efficient and allowed to obtain beneficial effects using low doses of the element. The Si supply via fertigation associated with foliar spraying only during the seedling formation phase promoted sufficient accumulation to mitigate the effects caused by the water deficit for a period of 7 to 60 days after transplantation, through the modulation of the antioxidant system, favoring the physiological metabolism, mainly in sugarcane. Complementary Si applications after transplanting had a beneficial effect on physiological and biochemical parameters, reducing damage caused by water deficit for a period of 7 to 160 days after transplantation in both species. Si also modified the C:N:P ratio and increased the efficiency of C, N and P use in sugarcane and energy cane plants under water deficit for both periods. Si is expected to be widely used in sugarcane and energy cane production systems to maintain global supply of present and future bioenergy needs, but with water sustainability.

**Keywords:** plant nutrition, beneficial element, *Saccharum officinarum* L., *Saccharum spontaneum* L., water use

## **CAPÍTULO 1 - Considerações gerais**

### **1 Introdução**

O setor sucroenergético é responsável pelo amplo cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), que possui capacidade para acumular altas concentrações de sacarose, sendo utilizada na produção de açúcar e etanol (Ferreira et al., 2017). Porém, diante da necessidade do setor de expandir a produção de bioeletricidade e bioetanol de segunda geração, recentemente tem-se verificado a inserção de novas espécies, como a cana-energia (*S. spontaneum* L.), que apresenta altos teores de fibra, baixo teor de sacarose e alto rendimento de biomassa (Cursi et al., 2021).

As áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar e de cana-energia têm expandido para regiões com menor disponibilidade hídrica, pela maior resistência da cana-energia a estresses ambientais (Cursi et al., 2021) ou pelo aumento do uso de irrigação suplementar (ANA, 2021) no cultivo de cana-de-açúcar. Apesar disso, em áreas com maior deficiência hídrica, os danos causados pela seca têm se agravado e estima-se que aumentem no futuro devido as mudanças climáticas (Besharat et al., 2020). No entanto, a produção em áreas com cultivo irrigado deve priorizar os manejos agrícolas baseados no uso racional da água, que é um recurso finito (Cardozo et al., 2018); e estima-se que o cultivo em área com recursos hídricos limitado, as culturas estarão sujeitas a período mais longo de exposição a déficits hídricos severos, podendo afetar inclusive a produção de espécies mais resistentes.

Os efeitos causados pelo déficit hídrico possuem grande importância para a cana-de-açúcar porque trata-se de uma espécie semi-perene que permanece no campo durante todas as estações climáticas e inclusive, em épocas com 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. A seca na fase de estabelecimento da cultura causa danos severos (Jain et al., 2015), especialmente quando são utilizadas mudas obtidas pelo sistema de mudas-pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas de mini-toletes, tendo baixas

reservas de nutrientes e água para a planta recém-transplantada no campo (Martins et al., 2015; Landell et al., 2012), podendo causar morte das mudas e falhas no campo. Quando o déficit hídrico ocorre em fases com elevadas taxas de crescimento relativo ( $\text{g dia}^{-1}$ ), período entre 84 e 135 dias após o transplântio da cana-planta (Dingre et al., 2021) os danos podem comprometer as fases fenológicas seguintes de desenvolvimento, especialmente o alongamento dos colmos (Ramesh, 2000).

Nesse contexto, o silício (Si) pode ser utilizado como atenuador dos danos causados pelo déficit hídrico nas plantas. Na cana-de-açúcar, os efeitos benéficos do Si induzem maior fotossíntese pela preservação da integridade de pigmentos fotossintéticos (Camargo et al., 2019) e da regulação de sistemas enzimáticos (Bezerra et al., 2019) e não-enzimáticos de defesa antioxidante (Teixeira et al., 2021). Além disso, os depósitos de Si nas paredes celulares dos vasos do xilema diminuem às perdas de água por transpiração (Camargo et al., 2021) e o Si também pode exercer função osmorreguladora modificando os teores de prolina (Bezerra et al., 2019; Teixeira et al., 2020a) e aumentando a absorção de água (Teixeira et al., 2020a; Camargo et al., 2021). Soma-se a isso, um efeito do Si para atenuar déficit hídrico relatado recentemente que está envolvido na maior homeostase estequiométrica elementar (C:N:P) favorecendo a eficiência de uso do C, N e P (Teixeira et al., 2020b). Contudo, esses efeitos são limitados para a cana-de-açúcar em períodos de déficit hídrico de curta duração. Portanto, exige-se avanços nas pesquisas para avaliar as respostas da cana-energia e da cana-de-açúcar sob déficit hídrico severo de intermediário e longo período de duração.

A partir das indicações de cenários futuros espera-se diminuição da disponibilidade hídrica em decorrência das mudanças climáticas. Esse cenário deve demandar o uso frequente de Si na produção agrícola, para tal, exige-se um método de aplicação eficiente. Assim, é possível que a fertirrigação associado com a pulverização foliar pode ser utilizada para aplicação de Si, porque no sistema de produção de MPB, utiliza-se a adubação via fertirrigação sob o substrato e a pulverização das folhas, devido a alta eficiência promovida pela aplicação de fertilizantes diluídos em água (Landell et al., 2012). Além disso, com o advento da cana-energia, as áreas destinadas a produção canavieira tem expandido para regiões

de menor pluviosidade que requer o uso de irrigações de salvamento (ANA, 2021), permitindo uma adaptação para o fornecimento de Si.

Aplicações de Si em cana-de-açúcar e cana-energia utilizando a fertirrigação podem contribuir para o aumento da quantidade de Si absorvida pela planta, por permitir o uso de fontes solúveis, de baixas concentrações em maiores frequências de aplicação e conseqüentemente, obter-se maiores efeitos benéficos do elemento, diminuindo as taxas de polimerização do Si no solo e as doses requeridas desse elemento por área.

Dessa forma, a realização deste trabalho pretendeu validar as seguintes hipóteses: (i) inicialmente, a absorção ótima de Si na formação de MPB pode promover um efeito residual na atenuação dos causados pelo déficit hídrico com duração de até 60 dias após o transplântio para o solo. (ii) a fertirrigação associada a pulverização foliar com Si na fase de formação de mudas com a complementação após o transplântio ( $<20 \text{ kg ha}^{-1}$  de Si) proporciona elevado acúmulo deste elemento nas plantas; (iii) o efeito do Si se deve à melhoria fisiológica induzida pelo aumento da atividade antioxidante, que diminui o estresse e favorece o acúmulo de biomassa nessas plantas; além disso, (iv) 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, mas que o fornecimento do Si pode reverter esses efeitos dependendo da quantidade recebida pela planta e da espécie.

Sendo aceita as hipóteses, deverá ser indicado o potencial do Si em solução (fertirrigação e foliar) aplicado na fase de formação da muda e no crescimento inicial da planta em doses relativamente baixa. A baixa dose deve diminuir os riscos ambientais e ser suficiente para melhorar o uso sustentável da água no período crítico de estabelecimento destas culturas. Espera-se que essa técnica seja amplamente utilizada pelos gestores envolvidos na cadeia de produção da cana-de-açúcar e da cana-energia tendo implicação ampla devido a importância da indústria destas culturas para suprimento global das necessidades presentes e futuras de bioenergia com sustentabilidade hídrica.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi avaliar se o Si aplicado fertirrigação associado com a pulverização foliar exclusivamente na fase de produção de mudas

ou com uma complementação após o transplântio para o solo é eficiente na mitigação dos efeitos causados pelo déficit hídrico por período de 7 até 60 ou 160 dias após o transplântio em plantas da cana-de-açúcar e na cana-energia, bem como, elucidar os mecanismos fisiológicos, bioquímicos, estruturais e nutricionais envolvidos.

## **2 Revisão de literatura**

### **2.1 Cultivo de cana-de-açúcar e de cana-energia**

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (*S. officinarum* L.) e um dos principais fornecedores de açúcar e etanol do mundo (FAO, 2021a). Na safra de 2019/20, o País produziu 642,7 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em uma área de colheita de 8,44 milhões de hectares, totalizando uma produtividade de 76,13 toneladas por hectare (CONAB, 2020). A região Centro-Sul foi responsável pela produção de 589 milhões de toneladas, correspondendo a cerca de 92% da produção brasileira, enquanto as regiões Norte e Nordeste produziram 52,8 milhões de toneladas, equivalente a 8% da produção do País (CONAB, 2020).

Historicamente a produção de cana tem sido destinada principalmente a produção de açúcar. Contudo, na safra 2019/20 a produção de açúcar foi de 29,8 milhões de toneladas e registrou-se a maior produção de etanol da história do setor sucroenergético brasileira, sendo de 34 bilhões de litros (CONAB, 2020). Esse aumento em parte é atribuído ao incentivo realizado pela aprovação da lei a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) (Lei nº13.576 de 27 de dezembro de 2017) que visa estimular a produção de biocombustíveis, como bioetanol, biodiesel, biogás, biometano e bioquerosene, por meio de incentivos fiscais e metas de redução de emissões de gases de efeito estufa (Chandel et al., 2021). Além do uso para a produção de açúcar e etanol, a cana-de-açúcar no Brasil também tem sido cada vez mais utilizada como fonte de energia, em um sistema denominado de cogeração, e também ao etanol de segunda geração ou etanol celulósico (Cursi et al., 2021), constituindo-se uma fonte sustentável e limpa de energia.

O desenvolvimento de fontes sustentáveis tem ganhado grande importância em todo o mundo devido à constatação da necessidade urgente de conter as emissões

de gases de efeito estufa para mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Antunes et al., 2019). Assim, a busca por fontes de energia renováveis tem avançado para o desenvolvimento de uma nova matriz energética que atenda a crescente demanda de energia com produção sustentável, evitando que haja competição com a produção de alimentos (Carvalho-Netto et al., 2014).

Atualmente além dos colmos que representam de 80 a 85% da biomassa total da cana-de-açúcar, as folhas e topos das plantas, que equivalem a cerca de 15% do peso dos colmos da cana adulta na colheita e quase 45% da energia potencialmente produzível, tem sido utilizadas tanto para combustão direta quanto para conversão, como cogeração de energia em calor ou eletricidade, ou conversão em combustível líquido, por meio da tecnologia de digestão de celulose (Carvalho-Netto et al., 2014). Assim, literaturas recentes indicam que as folhas secas (cerca de 60% da palha) devem ser utilizadas para bioprodutos e geração de eletricidade, enquanto as folhas verdes (40%) devem ser deixadas no campo para manter a reciclagem de nutrientes, bem como, para a conservação do solo (Chandel et al., 2021).

Outra mudança recente no setor sucroalcooleiro tem sido o resgate de espécies de cana destinadas à maior produção de biomassa, como a cana-energia (*S. spontaneum*) (Matsuoka, 2017). A incorporação da cana-energia nos cultivos do Brasil ocorreu devido as mudanças nos objetivos do melhoramento genético, que atualmente também tem atuado no desenvolvimento de variedades com alto rendimento de biomassa de baixo custo e alta eficiência energética que possam ser cultivadas em áreas marginais, ou seja, com maior tolerância a estresses ambientais (Matsuoka et al., 2014; Cursi et al., 2021).

A cana-energia é classificada de acordo com sua composição e finalidade de uso da matéria-prima (aptidão), como, tipo 1: acima de 15% de sacarose e 18% de fibra, destinada principalmente à produção de etanol de 2ª geração; e tipo 2: sacarose inferior a 6% e fibra superior a 28%, destinadas à geração de energia (Matsuoka et al., 2014). Assim, espera-se que o teor de fibra para as variedades de cana-energia do tipo II seja duas vezes maior no médio prazo, com um teor de açúcar de 20% a 50% menor no caldo em comparação com a cana-de-açúcar. Além disso, existem indicações de que a cana-energia seja mais tolerante a pragas e doenças e sua taxa

de multiplicação seja de até 16 vezes maior que a da cana-de-açúcar (Cursi et al., 2021).

O uso de cana-energia tem sido indicado como potencial devido ao seu elevado rendimento de produção de biomassa, sua grande capacidade de conversão do carbono (C) atmosférico em C orgânico, a sua alta densidade energética e também pela alta resistência a estresses bióticos e abióticos, permitindo produção com menos insumos (menos fertilizantes, pesticidas e energia) e em terras menos férteis e com menor disponibilidade hídrica, temperaturas mais extremas e em solos salinos (Cursi et al., 2021). Esses fatores, tem causado uma expansão da área de produção canavieira, atingindo regiões com solos de baixa fertilidade natural e com ocorrência de deficiência hídrica. Contudo, as respostas da cana-energia sob condições de deficiência hídrica ainda não foram evidenciadas em cultivos de solos do Brasil, havendo a necessidade de avanços em estudos que possam validar o potencial sugerido ou realizar adequações nos sistemas de cultivo, como o uso de irrigação.

## **2.2 Cana-de-açúcar cultivada em sistema irrigado**

A cana-de-açúcar requer grandes volumes de água para atingir a produtividade máxima, variando de água de 1.500 a 2.500 mm ao ano, a depender do clima, distribuídas uniformemente ao longo da estação de cultivo (FAO, 2021b). Isso evidencia que embora a cana-de-açúcar seja reconhecida como tolerante a níveis mais elevados de déficit hídrico do que outras culturas agrícolas, ela ainda requer grande volume de água para atingir o rendimento máximo (Scarpate et al., 2016).

As regiões mais produtoras de cana-de-açúcar no Brasil apresentam predominantemente condições climáticas favoráveis para o desenvolvimento da cultura sem irrigação (ANA, 2021). Contudo, devido a expansão do setor sucroalcooleiro, nos últimos anos tem havido um aumento no cultivo de cana-de-açúcar em áreas com eventos de seca mais frequentes (Scarpate et al., 2016; Cardozo et al., 2018), essa condição exige a realização de irrigações suplementares. Em áreas de menor ocorrência de deficiência hídrica, o uso da irrigação também tem se intensificado com o objetivo de ganhar produtividade (Cardozo et al., 2018). Além disso, a irrigação tem sido usada para dispersão dos efluentes dos processos industriais (em especial a vinhaça) em consonância com as regras ambientais, que

não permitem a dispersão diretamente nos corpos hídricos e pela evidenciada reciclagem de potássio proporcionada (CETESB, 2006).

A adoção da irrigação apresenta restrições de natureza econômica e ambiental (Scarpore et al., 2016), pois a água é um recurso finito que exige uso racional (Cardozo et al., 2018). No Brasil, as usinas atualmente dispõem de equipamentos de irrigação para uso em fertirrigações nas áreas de cultivo, aplicando-se vinhaça e/ou água residuária advinda dos processos de produção de etanol e de açúcar (ANA, 2021). Mas em regiões de cultivo com maior limitação hídrica, o reuso do processo industrial é consorciado com aplicação de água doce, técnica conhecida no setor como irrigação de salvamento, que são geralmente realizadas após o transplântio de mudas e cortes de soqueiras. Além disso, pode-se realizar irrigações plenas para viabilizar a produção em regiões de déficit mais acentuado ou quando decide-se investir visando ganhos de produtividade e qualidade (ANA, 2021).

Fica evidente que a irrigação proporciona aumento de produtividade no cultivo da cana-de-açúcar (Inman-Bamber e Smith, 2005). Neste cenário, têm havido a ampliação do cultivo irrigado da cana-de-açúcar, com destaque nos países maiores produtores mundiais da cultura, como o Brasil (ANA, 2021) e a China (He et al., 2021), e em outras regiões do mundo como na Índia (Dingre et al., 2021). No Brasil, atualmente a área de cultivo de cana-de-açúcar equipada para irrigação é de 3,66 milhões de hectares (ANA, 2021), o que representa cerca de 43% de toda a área cultivada com a espécie (8,44 milhões de hectares) (CONAB, 2020). Na maior parte da área com cana irrigada, cerca de 2,9 milhões de hectares (79,5%) realiza-se apenas fertirrigação, os outros 749 mil hectares (20,5%) são irrigados com água doce (ANA, 2021).

O uso da água para irrigação e/ou fertirrigação deve considerar não só os custos envolvidos (água, energia, etc.) e o retorno direto em termos de aumento de produtividade, mas também a eficiência e os benefícios indiretos associados a diminuição dos impactos ambientais (Cardozo et al., 2018). A eficiência pode ser aumentada com a aplicação de água de forma racional proporcionada pela instalação adequada e manutenção dos sistemas de irrigação, diminuindo a quantidade de água consumida por unidade de biomassa produzida (Scarpore et al., 2016).

A cana-de-açúcar de sequeiro demandou de 663,9 m<sup>3</sup> de água por ciclo de produção em Ribeirão Preto – SP a 1274,5 m<sup>3</sup> de água em Petrolina – PE, mas com o uso da irrigação o volume total de água para produzir a mesma quantidade de matéria-prima foi menor, principalmente em Petrolina – PE com demanda hídrica 69% menor, de 750,3 m<sup>3</sup> de água por ciclo de produção (Cardozo et al., 2018). Assim, fica evidente a necessidade da redução do consumo e do aumento do aproveitamento econômico da água, ou seja, da eficiência de uso da água, para garantir recursos de abastecimento alimentar adequados como pré-requisitos para uma produção agrícola sustentável (Firouzabadi et al., 2021).

A eficiência de uso da água ganha ainda mais destaque com a crescente ocorrência de eventos de secas, com perspectiva de aumento no futuro devido as mudanças climáticas (Besharat et al., 2020), sendo considerado um dos principais fatores que limitam a produção agrícola (Schaller et al., 2020) causando perdas na produtividade da cana-de-açúcar e também da cana-energia.

### **2.3 Danos causados pelo déficit hídrico em cana-de-açúcar e cana-energia**

O déficit hídrico é um dos estresses abióticos que mais ameaçam a segurança alimentar e produção energética, pois limita a produção de várias culturas de importância agrícola, como a cana-de-açúcar (Ferreira et al., 2017). Esses efeitos têm se agravado dada as mudanças climáticas, sendo que os cultivos agrícolas estão cada vez mais sujeitos a recursos hídricos limitados, tendo um período mais longo de exposição ao déficit hídrico (Besharat et al., 2020) que tem ocorrido com maior intensidade, principalmente em regiões com solos arenosos e com baixa capacidade de retenção de água (Schaller et al., 2020).

Os danos causados pelo déficit hídrico são importantes ao cultivo da cana-de-açúcar porque trata-se de uma espécie semi-perene que permanece no campo durante todas as estações climáticas e os plantios ocorrem em quase todas as épocas do ano (Basnayake et al., 2012). A exposição das plantas a períodos de baixa pluviosidade pode causar limitação ao seu desenvolvimento, principalmente quando ocorre em fases importantes, como a inicial de estabelecimento em campo e a de grande crescimento relativo. A seca na fase de estabelecimento da cultura causa danos severos (Jain et al., 2015), especialmente quando são utilizadas mudas obtidas

pelo sistema de MPB, oriundas de gemas individualizadas de mini-toletes, tendo baixas reservas de nutrientes e água para a planta recém-transplantada no campo (Martins et al., 2015), podendo causar morte das mudas e falhas no campo. Quando o déficit hídrico ocorre em fases com elevadas taxas de crescimento relativo, que pode ocorrer entre 84 e 135 dias após o transplântio da cana-planta (Dingre et al., 2021) os danos podem comprometer as fases fenológicas seguintes de desenvolvimento, especialmente o alongamento dos colmos (Ramesh, 2000).

Os efeitos causados pelo déficit hídrico em plantas de cana-de-açúcar comprometem aspectos fisiológicos, sendo caracterizados principalmente pela diminuição do conteúdo de água (Teixeira et al., 2020a) em decorrência do aumento da transpiração (Verma et al., 2021), diminuição do potencial hídrico foliar (Oliveira Filho et al., 2021) e desequilíbrio do ajuste osmótico (Pei et al., 2010). Além disso, também podem afetar aspectos bioquímicos, diminuindo a ação de antioxidantes de defesa enzimáticos (Bezerra et al., 2019) e não-enzimáticos (Teixeira et al., 2021) devido a degradação das camadas lipídicas das membranas desses compostos como reflexo do aumento do estresse oxidativo. Esses efeitos combinados causam diminuição na taxa fotossintética (Verma et al., 2021), e conseqüentemente, no desenvolvimento e na produção de matéria seca das plantas.

Tem surgido novos enfoques para justificar a diminuição da produção de massa seca causado pelo déficit hídrico, que se refere a modificação da estequiometria de nutrientes com função estrutural como C, N e P, essas mudanças causam desequilíbrio iônico e diminuem a homeostase nutricional, comprometendo a eficiência de uso desses nutrientes em sistemas vivos (Elser e Hamilton, 2007). Assim, existem indicações que o déficit hídrico ao causar modificação da homeostase estequiométrica elementar induz desequilíbrio nutricional e isso constitui um dos fatores responsáveis por diminuir o crescimento de plantas muito jovens de cana-de-açúcar exposta ao déficit hídrico por período máximo de 30 dias após o transplântio (Teixeira et al., 2020b). No entanto, é comum período de seca mais longo em cultivos de cana-de-açúcar (Cardozo et al., 2018) e acredita-se que esse desequilíbrio nutricional deve-se agravar.

Para a cana-energia, não existem evidências científicas que relatam os efeitos causados pelo déficit hídrico em cana-planta, fato preocupante devido a expansão do cultivo dessa espécie, principalmente em regiões com solos arenosos e com ocorrência frequente de eventos de seca. Assim, para que o potencial para produção de bioenergia e bioetanol apresentado pela cana-energia seja eficiente explorado, exige-se um aprofundamento de pesquisas que avaliem as respostas das plantas sob os ambientes de cultivos que podem ocorrer em regiões destinadas ao plantio dessa espécie.

Dessa forma, a busca por estratégias de manejo que possam colaborar na diminuição das perdas causados pelo déficit hídrico têm sido relevantes para viabilizar a expansão do plantio da cana-de-açúcar e da cana-energia em novas áreas de cultivo com menor pluviosidade, diminuindo os danos causados pelo déficit hídrico severo de longa duração em fases de importante crescimento das plantas.

#### **2.4 Silício na mitigação dos danos causados pelo déficit hídrico em cana-de-açúcar e cana-energia**

O silício (Si) é considerado um elemento químico benéfico para as plantas terrestres e essencial para as equisetáceas (pteridófitas, equisetíneas e isospóricas) e algumas algas (diatomáceas) (Epstein, 1999). O Si é o segundo elemento químico mais abundante na crosta terrestre depois do oxigênio, sendo que o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) compreende 50-70% da massa do solo (Epstein, 1994), mas na solução do solo o Si disponível está na forma de ácido monosilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) em concentração baixa ( $\sim 1 \text{ mmol L}^{-1}$ ) (Katz et al., 2021).

O Si é absorvido na forma de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  estando na mesma forma na seiva do xilema (Mitani et al., 2005). A concentração do elemento no solo varia em função do material de origem, dos níveis de intemperismo ou das adubações realizadas. Em solos argilosos, o teor de Si pode variar de 200 a 300  $\text{g kg}^{-1}$  e em solos arenosos, o teor médio é de 450  $\text{g kg}^{-1}$  (Tubana et al., 2016). Entretanto, grande parte desse elemento presente no solo está na forma inerte, não disponível em solução, o que limita a absorção pelas plantas (Katz et al., 2021). A baixa disponibilidade de Si assimilável para as plantas é maior em regiões de clima tropical, pois as condições climáticas aumentam a vulnerabilidade dos solos à ocorrência de eventos que

favorecem a dessilicação, como a lixiviação, a elevada acidez e os baixos valores de saturação por bases (Keeping, 2017; Tubana et al., 2016). Essas características são comuns em Argissolos, Latossolos e Neossolos, solos altamente intemperizados e que, portanto, apresentam baixos teores de Si (Tubana et al., 2016; Schaller et al., 2020).

Devido ao alto grau de intemperismo dos solos do Brasil, o Si representa cerca de 5 a 40% na sua composição (Crusciol et al., 2013). Além disso, a disponibilidade desse elemento também depende de características do solo, como o pH, que aumenta proporcionalmente a sua dissociação, e conseqüentemente, a sua disponibilidade para as plantas (Mandlik et al., 2020). O elemento pode ser adicionado ao solo através da aplicação de fertilizantes silicatados (Camargo et al., 2021) ou ainda pela decomposição de resíduos vegetais (Katz, 2014).

A decomposição de resíduos vegetais é relevante em áreas com plantios de espécies acumuladoras do elemento, como a cana-de-açúcar, que chega a remover até 700 kg ha<sup>-1</sup> ao ano (Keeping, 2017). Por essa razão, o cultivo de cana-de-açúcar de forma extensiva expõe o solo ao declínio dos teores de Si causado pela absorção contínua deste elemento pelas soqueiras sem o devido reabastecimento do Si através de adubações, resultando em diminuição no desempenho produtivo de cultivos em todo o mundo (Majumdar e Prakash, 2020). Estudos recentes validaram que uma quantidade substancial de Si armazenado nas plantas é removida do campo no momento da colheita e não retorna diretamente ao solo (Katz et al., 2021; Crusciol et al., 2013). Portanto, o resíduo acumulado da colheita pode desempenhar um papel importante na manutenção do equilíbrio de Si nos campos de cultivo (Singh et al., 2021).

Existem recomendações oficiais de Si em alguns países como Filipinas (IRRI, 1993), Japão (Liang et al., 2015) e Estados Unidos (Tubana et al., 2016). Contudo, aplicação de Si nos cultivos do Brasil ainda não possuem recomendação oficial, sendo comumente fornecido às culturas a partir do uso de fontes provenientes da siderurgia, constituída basicamente por silicato de cálcio e magnésio e termofosfatos magnesiano (Sousa et al., 2010). No entanto, o uso do silicato de cálcio, por exemplo, exige aplicação de altas doses (próximas de 1000 kg ha<sup>-1</sup> de Si) e necessita ser incorporado

no solo para favorecer sua dissolução (Camargo et al., 2021). Além disso, deve-se atentar a qualidade desse material que podem apresentar concentração de metais pesados e causar alteração de pH em solos já corrigidos (Mandlik et al., 2020).

O uso do Si nos cultivos agrícolas tem sido eficiente para atenuar os efeitos prejudiciais causados por estresses ambientais, como o déficit hídrico (Epstein, 1994), um fenômeno cada vez mais comum em áreas destinadas exploração agrícola (Cardozo et al., 2018). A aplicação de Si pode interferir em diversos fatores que contribuem para o aumento da tolerância das plantas a condição estressante, como a sedimentação de sílica amorfa ou biogênica na superfície foliar que constitui 90% do Si absorvido (Yoshida, 1965), que pode ser transformado em estruturas de Si-celulose presente na parede celular (Raven, 1983). Esse efeito previne o desequilíbrio do status hídrico foliar em plantas sob déficit hídrico, pois os depósitos deste elemento nas paredes celulares diminuem às perdas de água por transpiração (Pei et al., 2010), colaborando na preservação do conteúdo de água no tecido foliar (Teixeira et al., 2020a), diminuindo as alterações no potencial hídrico (Teixeira et al., 2021) e melhorando a eficiência de uso da água (Frew et al., 2018).

As modificações físicas causadas pela deposição de sílica associada à celulose na epiderme foliar e abaixo da cutícula, são mais frequentes em plantas da família Poaceae (Mitani-Ueno e Ma, 2021) porque absorvem maiores quantidades de Si, dada a atividade de proteínas especializadas nas membranas celulares (Mitani et al., 2009). Nesse grupo de planta existe um predomínio de Si contido nas paredes celulares como sílica amorfa (Neethirajan et al., 2009) e em complexos orgânicos com a celulose (Yoshida, 1965), hemicelulose (He et al., 2015) e outros componentes da parede celular (Isa et al., 2010). A formação destes compostos sílico-orgânico na parede celular ocorre em detrimento da síntese de lignina (Schoelynck et al., 2010). Essa substituição possui interesse biológico porque o custo energético para incorporação de Si em compostos estruturais é 50 vezes menor do que em compostos orgânicos, devido à sua alta permeabilidade intrínseca nas bicamadas lipídicas (Raven, 1983). Isso induz diminuição do teor de C da parede celular que pode refletir nas folhas das plantas que receberam Si, modificando a razão estequiométrica C:Si especialmente sob déficit hídrico (Rocha et al., 2021), embora também possa ocorrer em plantas sem estresse (Neu et al., 2017). Assim, o efeito benéfico do Si na

atenuação do déficit hídrico ocorreria devido a homeostase estequiométrica elementar envolvendo além do C os nutrientes estruturais N e o P que favoreceria equilíbrio das funções nutricionais destes elementos nas plantas e conseqüentemente, na eficiência nutricional.

Contudo, uma pequena parte de Si a um nível nanométrico está contida em estruturas intercelulares (Woesz et al., 2006) com potencial para induzir efeito em atributos fisiológicos e bioquímicos, preservando e até ativando os sistemas de defesa das plantas que causam ação antioxidante (Katz, 2014). Esses efeitos podem inicialmente colaborar para que plantas tratadas com Si possuam maior conteúdo de água porque o elemento contribui na absorção de água pelas raízes ao induzir aumento do potencial hídrico pela ação osmorreguladora da prolina (Avila et al., 2021). Aliado a isso, pode ocorrer aumento da atividade das aquaporinas, que são proteínas especializadas na absorção de água pelas plantas e que podem ter a expressão de seus genes estimulada pelo Si (Abbas et al., 2015; Chen et al., 2016). A manutenção do status hídrico proporcionado pelo Si colabora para diminuição dos danos causados aos centros de reação do fotossistema II, aumentando o aproveitamento da radiação solar na fase fotoquímica da fotossíntese (Verma et al., 2021) e prevenindo a formação excessiva de espécies reativas de oxigênio (ERO) (Inman-Bamber e Smith, 2005).

A diminuição do estresse oxidativo colabora na preservação da integridade celular, aumentando o conteúdo de pigmentos fotossintetizantes (Camargo et al., 2019; Teixeira et al., 2020a; Teixeira et al., 2021), que também tem efeito positivo na manutenção da alta eficiência fotoquímica (Verma et al., 2021) e favorece o aumento da duração das folhas verdes ativas na planta e conseqüentemente, a taxa fotossintética e o crescimento da planta. Além disso, o Si também exerce um papel importante na regulação dos sistemas de defesa antioxidante enzimáticos (Bezerra et al., 2019) e não-enzimáticos (Teixeira et al., 2021) e aumenta a tolerância da planta aos danos causados pela seca.

Os efeitos do Si em plantas sob déficit hídrico são dependentes de características genótípicas, pois cada espécie possui um nível de tolerância aos danos, bem como, depende da intensidade e duração dele e da fase de desenvolvimento em que as plantas são expostas. Desse modo, acredita-se que

espécies com maior tolerância à seca, como é sugerido para a cana-energia (Cursi et al., 2021) podem apresentar respostas ao Si diferentes, em relação a espécie mais sensíveis, como a cana-de-açúcar. Contudo, não existem relatos dos efeitos benéficos do Si em plantas de cana-energia sob déficit hídrico. Além disso, para a cana-de-açúcar a duração do déficit hídrico usado nos trabalhos é curto, havendo dúvida de que se houver período de déficit hídrico mais extenso de dois ou até cinco meses, que é mais comum em áreas cultivadas com cana-de-açúcar ou cana-energia, poderia anular ou diminuir esse benefício do Si nas plantas.

O cenário futuro indica possível agravamento da ocorrência de estresses ambientais como o déficit hídrico, que pode demandar o uso frequente do Si na agricultura para garantir a segurança alimentar. Essa condição exige aumento na eficiência das aplicações deste elemento benéfico, tendo como estratégia o uso da fertirrigação que poderia diminuir as taxas de polimerização do Si no solo e conseqüentemente, as doses deste elemento por área, garantindo adequada absorção do elemento pela planta e diminuição de impactos ambientais.

## **2.5 Fertirrigação e pulverização foliar com silício**

A fertirrigação consiste na aplicação de fertilizante diluídos na água de irrigação. Pode ser aplicada usando qualquer sistema de irrigação, mas os sistemas com água pressurizada são preferíveis pois permitem aplicação mais uniforme de água e fertilizantes, bem como, maior eficiência de uso da água, o que é particularmente vantajoso em face da crescente escassez de água (Guido et al., 2020). Diante desses aspectos, acredita-se o fornecimento de Si via fertirrigação associado com a pulverização foliar é uma forma com potencialmente viável porque pode induzir absorção do elemento pelos órgãos folhas e raízes, aumentando consideravelmente os teores de Si nas plantas e seus efeitos benéficos.

Uma das maiores limitações para o uso de Si em solução é a alta facilidade de polimerização, sendo que em concentrações maiores que  $3 \text{ mmol L}^{-1}$  pode ser polimerizado (Birchall, 1995), formando dímeros, trímeros e cadeias poliméricas de Si (McKeague e Cline, 1963) que não são absorvidas pelas plantas. Nesse sentido, a fertirrigação é interessante porque possibilita o uso de baixas doses ( $<20 \text{ kg ha}^{-1}$  de Si) com concentrações de Si em solução variando de 1,5 a  $3,0 \text{ mmol L}^{-1}$  evitando a

ocorrência de polimerização. Além disso, é possível o uso de fontes com maior estabilidade, como o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol (Santos et al., 2020). O sorbitol é um poliol que contribui para manter as formas monoméricas do Si formando complexos orgânicos (Kubicki e Heaney, 2003) e diminui o ponto de deliquescência da gota na superfície foliar (Babiker e Duncan, 1974) retardando a sua secagem e contribuindo para absorção do elemento pela superfície foliar, principalmente durante a fase de penetração da cutícula (Fernández e Brown, 2013), favorecendo a absorção do elemento pelas plantas.

A estabilidade das formas monoméricas de Si também é favorecida pela acidificação da solução no momento da aplicação, diminuindo o valor pH da solução ( $5,5 \pm 0,2$ ). A acidificação de soluções contendo Si desloca a reação para a direita ( $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-} \rightarrow \text{H}_3\text{SiO}_4^{-1} \rightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$ ) induzindo o predomina de espécies monoméricas do elemento (Kudryavtsev e Figovsky, 2016). Além disso, com a fertirrigação, dependendo no manejo utilizado é possível realizar aplicações com maior frequência. Esses fatores somados melhoram a qualidade da solução de Si aplicada nas plantas e a absorção do elemento, sendo possível manejá-las ao se utilizar a fertirrigação associado com a pulverização foliar.

As mudanças no sistema de cultivo de cana-de-açúcar, que atualmente utiliza a produção de MPB, têm colaborado para o uso da fertirrigação, pois nos viveiros utiliza-se a adubação via fertirrigação sob substrato e a pulverização das folhas, pela alta eficiência proporcionada (Landell et al., 2012). Além disso, com o advento da cana-energia, as áreas destinadas a produção canavieira tem expandido para regiões de menor pluviosidade que requer o uso de irrigações de salvamento (ANA, 2021). Portanto, acredita-se que havendo eficiência, as aplicações de Si em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e de cana-energia podem utilizar o recurso da fertirrigação e pulverização foliar após o transplântio, podendo contribuir para o aumento da quantidade de Si absorvida pela planta.

O aumento da absorção de Si proporcionado pela aplicação do elemento via fertirrigação combinada com a pulverização foliar já foi verificada em plantas forrageiras (Rocha et al., 2021), e em cana-de-açúcar apenas na fase de produção de mudas pré-brotadas (Teixeira et al., 2021) e na primeira soqueira de cana-de-açúcar

(Oliveira Filho et al., 2021). Contudo, a eficiência do fornecimento de Si via fertirrigação e pulverização pode variar em função da espécie utilizada e do ambiente de cultivo (Ramesh, 2000). Mas faltam estudos em cana-planta de cana-de-açúcar e de cana-energia cultivadas sob condição de déficit hídrico severo por longos períodos de duração, bem como, em fases de crescimento com maior sensibilidade, como a fase inicial de estabelecimento após o transplante das mudas e a fase de elevada taxa de crescimento relativo que pode ocorrer entre 84 e 135 dias após o transplante (Dingre et al., 2021).

### 3. Referências

Abbas T, Balal RM, Shahid MA, Pervez MA, Ayyub C M, Aqueel M A, Javaid MM (2015) Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. **Acta Physiologiae Plantarum** 37:1–15. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1768-5>

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 01 de abril de 2021.

Antunes FAF, Chandel AK, Terán-Hilares R, Milessi TSS, Travalia BM, Ferrari FA, Hernandez-Pérez A F, Ramos L, Marcelino PF, Brumano LP, Silva GM, Forte MBS, Santos JC, Felipe MGA, da Silva SS (2019) Biofuel production from sugarcane in Brazil. In Sugarcane Biofuels (pp. 99–121). **Springer International Publishing**. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-18597-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-18597-8_5)

Avila RG, Magalhães PC, da Silva EM, de Souza KRD, Campos CN, de Alvarenga AA, de Souza TC (2021) Application of silicon to irrigated and water deficit sorghum plants increases yield via the regulation of primary, antioxidant, and osmoregulatory metabolism. **Agricultural Water Management** 255:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107004>

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

Basnayake J, Jackson PA, Inman-Bamber NG, Lakshmanan P (2012) Sugarcane for water-limited environments. Genetic variation in cane yield and sugar content in response to water stress. **Journal of Experimental Botany** 63:6023–6033. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers251>

Besharat S, Barão L, Cruz C (2020) New strategies to overcome water limitation in cultivated maize: Results from sub-surface irrigation and silicon fertilization. **Journal of Environmental Management** 263:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110398>

Bezerra, BKL, Lima GPP, dos Reis AR, Silva MA, de Camargo MS (2019) Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum** 41:189-189. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>

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

Camargo MS, Bezerra BKL, Holanda LA, Oliveira AL, Vitti AC, Silva M A (2019) Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 19(1), 81–9. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>

Camargo MS, Honaine MF, Osterrieth M, Bozza NG, Silva MV, Benvenuto ML, de Almeida SM (2021) 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** 1:1-15. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05063-z>

Cardozo NP, Bordonal RO, La Scala N (2018) Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. **Journal of Cleaner Production** 204:861–87. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.004>

Carvalho-Netto OV, Bressiani JA, Soriano HL, Fiori CS, Santos JM, Barbosa GV, Xavier MA, Landell MG, Pereira GA (2014) The potential of the energy cane as the main biomass crop for the cellulosic industry. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture** 1:1–20. <https://doi.org/10.1186/s40538-014-0020-2>

CETESB (2006). Vinhaça – **Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. Companhia Ambiental Do Estado de São Paulo, P4.231, 1–12. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/camaras/P4\\_231.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/camaras/P4_231.pdf)>. Acesso em: 15 jan. de 2021.

Chandel AK, Forte MBS, Gonçalves IS, Milessi TS, Arruda PV, Carvalho W, Mussatto SI (2021) Brazilian biorefineries from second generation biomass: critical insights from industry and future perspectives. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**. <https://doi.org/10.1002/bbb.2234>

Chen D, Cao B, Wang S, Liu P, Deng X, Yin L, Zhang S (2016) Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific Reports** 6:1–14. <https://doi.org/10.1038/srep22882>

CONAB (2020) **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: safra 2019/2020**. Companhia Nacional de Abastecimento, 6(4), 58. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>>. Acesso em 10 de jun de 2021.

Crusciol CAC, Ferrari Neto J, Soratto RP, Costa CHM (2013) Cycling of nutrients and silicon in pigeonpea and pearl millet monoculture and intercropping. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo** 37:1628–1640. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832013000600019>

Cursi DE, Hoffmann HP, Barbosa G VS, Bressiani JA, Gazaffi R, Chapola RG, Fernandes Junior AR, Balsalobre TWA, Diniz CA, Santos JM, Carneiro MS (2021) History and current status of sugarcane breeding, germplasm development and molecular genetics in Brazil. **Sugar Tech** 1:1-22. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-00951-1>

Dingre SK, Gorantiwar SD, Kadam SA (2021) Correlating the field water balance derived crop coefficient (Kc) and canopy reflectance-based NDVI for irrigated sugarcane. **Precision Agriculture** 22:1134–1153. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09774-8>

Elser JJ, Hamilton A (2007) Stoichiometry and the new biology: The future is now. **PLoS Biology** 5:1403–1405. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0050181>

Epstein E (1994) The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** 91(1), 11–17. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>

Epstein E (1999) Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology** 50:641–664.

FAO (2021a) **Land & water: sugarcane**. Food and Agricultural Organisation of the United Nations. Disponível em: <<http://www.fao.org/land-water/>>. Acesso em: 16 de dez. de 2020.

FAO (2021b) **The agricultural production indices**. Food and Agricultural Organisation of the United Nations. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/%0A>>. Acesso em: dez. de 2020.

Fernández V, Brown PH (2013). From plant surface to plant metabolism: the uncertain fate of foliar-applied nutrients. **Frontiers in Plant Science** 4:1–5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00289>

Ferreira THS, Tsunada MS, Bassi D, Araújo P, Mattiello L, Guidelli GV, Righetto GL, Gonçalves VR, Lakshmanan P, Menossi M (2017) Sugarcane water stress tolerance mechanisms and its implications on developing biotechnology solutions. **Frontiers in Plant Science** 8:1–18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01077>

Firouzabadi AG, Baghani J, Jovzi M, Albaji M (2021) Effects of wheat row spacing layout and drip tape spacing on yield and water productivity in sandy clay loam soil in a semi-arid region. **Agricultural Water Management** 251:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106868>

Frew A, Weston LA, Reynolds OL, Gurr GM (2018) The role of silicon in plant biology: A paradigm shift in research approach. **Annals of Botany** 12:1265–1273. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy009>

Guido V, Finzi A, Ferrari O, Riva E, Quílez D, Herrero E, Provolo G (2020) Fertigation of maize with digestate using drip irrigation and pivot systems. **Agronomy** 10: 1453. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101453>

He SS, Zeng Y, Liang ZX, Jing Y, Tang SY, Zhang B, Yan H, Li S, Xie T, Tan F, Li, M (2021) Economic evaluation of water-saving irrigation practices for sustainable

sugarcane production in Guangxi Province, China. **Sugar Tech** 1:1-10. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-00965-9>

He C, Ma J, Wang L (2015). A hemicellulose-bound form of silicon with potential to improve the mechanical properties and regeneration of the cell wall of rice. **New Phytologist** 206: 1051–1062. <https://doi.org/10.1111/nph.13282>

Inman-Bamber NG, Smith DM (2005) Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research** 92:185–202. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.023>

IRRI (1993) **Rice research in a time change: IRRI's medium-term plan for 1994-1998**. Filipinas: International Rice Research Institute.

Isa M, Bai S, Yokoyama T, Ma JF, Ishibashi Y, Yuasa T, Iwaya-Inoue M (2010) Silicon enhances growth independent of silica deposition in a low-silica rice mutant, Isi1. **Plant and Soil** 331:361–375. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0258-9>

Jain R, Chandra A, Venugopalan V, Solomon S (2015) Physiological changes and expression of SOD and P5CS genes in response to water deficit in sugarcane. **Sugar Tech** 17:276–282. <https://doi.org/10.1007/s12355-014-0317-2>

Katz O (2014) Beyond grasses: the potential benefits of studying silicon accumulation in non-grass species. **Frontiers in Plant Science** 5:1–3. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00376>

Katz O, Puppe D, Kaczorek D, Prakash NB, Schaller J (2021) Silicon in the soil–plant continuum: Intricate feedback mechanisms within ecosystems. **Plants** 10:1–36. <https://doi.org/10.3390/plants10040652>

Keeping MG (2017) 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** 8:1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00760>

Kubicki JD, Heaney PJ (2003) Molecular orbital modeling of aqueous organosilicon complexes: Implications for silica biomineralization. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 67:4113–4121. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00093-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00093-3)

Kudryavtsev PG, Figovsky OL (2016) Nanocomposite organomineral hybrid materials. Part I. **Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal** 8:16–49. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2016-8-3-16-56>

Landell MGA, Campana MP, Figueiredo P, Xavier MA, Anjos I A, Dinardo-Miranda LL, Scarpari MS, Garcia JC, Bidóia MAP, Silva DN, Mendonça JR, Kanthack RAD, Campos MF, Brancalião SR, Petri RH, Miguel PEM (2012) **Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 22p (Documentos, 109).

Liang Y, Nikolic M, Bélanger R, Gong H, Song A (2015) Silicon in Agriculture. In Silicon in Agriculture. **Springer Netherlands**. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2>

Majumdar S, Prakash NB (2020) An overview on the potential of silicon in promoting defence against biotic and abiotic stresses in sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 20:1969–1998. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00269-z>

Mandlik R, Thakral V, Raturi G, Shinde S, Nikolić M, Tripathi DK, Sonah H, Deshmukh R (2020) Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. **Journal of Experimental Botany** 71:6703–6718. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>

Martins APC, Albrecht LP, Castaldo J, Carneiro R, Zucareli V (2015) Novas tecnologias no plantio de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). **Journal of Agronomic Sciences** 4:301–317.

Matsuoka S (2017) Free fiber level drives resilience and hybrid vigor in energy cane. **Journal of Scientific Achievements** 2:1–35.

Matsuoka S, Kennedy AJ, Santos EGD, Tomazela AL, Rubio LCS (2014) Energy cane: Its concept, development, characteristics, and prospects. **Advances in Botany** 1:1–13. <https://doi.org/10.1155/2014/597275>

McKeague JA, Cline MG (1963) Silica in soils. In **Advances in Agronomy** 15:339–396. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60403-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60403-4)

Mitani-Ueno N, Ma JF (2021) Linking transport system of silicon with its accumulation in different plant species. **Soil Science and Plant Nutrition** 67:10–17. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1845972>

Mitani N, Yamaji N, Ma JF (2009) Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology** 50:5–12. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcn110>

Mitani N, Ma JF, FM, Iwashita T (2005) Identification of the silicon form in xylem sap of rice (*Oryza sativa* L.). **Plant and Cell Physiology** 46:279–283. <https://doi.org/10.1093/pcp/pci018>

Neethirajan S, Gordon R, Wang L (2009) Potential of silica bodies (phytoliths) for nanotechnology. **Trends in Biotechnology: Cell Press** 27:461–467. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.05.002>

Neu S, Schaller J, Dudel EG (2017) Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports** 7:3–10. <https://doi.org/10.1038/srep40829>

Oliveira Filho, ASB, Prado RM, Teixeira GCM, Rocha AMS, Souza Junior JP, Piccolo, MC, Rocha JR (2021) 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** 255:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107006>

Pei ZF, Ming DF, Liu D, Wan GL, Geng XX, Gong HJ, Zhou W J (2010) Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. **Journal of Plant Growth Regulation** 29:106–115. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9120-9>

Ramesh P (2000) 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** 185:83–89. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2000.00404.x>

Raven JA (1983) The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews** 58:179–207. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185x.1983.tb00385.x>

Rocha JR, Prado RM, Teixeira GCM, Oliveira Filho, ASB (2021). Si fertigation attenuates water stress in forages by modifying carbon stoichiometry, favouring physiological aspects. **Journal of Agronomy and Crop Science** 1:1–13. <https://doi.org/10.1111/jac.12479>

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

Scarpare FV, Hernandez TAD, Ruiz-Corrêa ST, Picoli MCA, Scanlon BR, Chagas MF, Duft DG, Cardoso TF (2016) Sugarcane land use and water resources assessment in the expansion area in Brazil. **Journal of Cleaner Production** 133:1318–1327. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.074>

Schaller J, Cramer A, Carminati A, Zarebanadkouki M (2020) Biogenic amorphous silica as main driver for plant available water in soils. **Scientific Reports** 10:1–7. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59437-x>

Schoelynck J, Bal K, Backx H, Okruszko T, Meire P, Struyf E (2010) Silica uptake in aquatic and wetland macrophytes: A strategic choice between silica, lignin and cellulose? **New Phytologist** 186:385–391. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03176.x>

Singh T, Singh P, Singh A (2021) Silicon significance in crop production: Special consideration to rice: An overview. **The Pharma Innovation** 10:223–229. <https://doi.org/10.22271/tpi.2021.v10.i3d.5776>

Sousa RTX, Korndörfer GH, Wangen DRB (2010) Aproveitamento de silício proveniente de escória siderúrgica por cultivares de cana-de-açúcar. **Bragantia** 69:669–676. <https://doi.org/10.1590/s0006-87052010000300019>

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

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

Teixeira GCM, Prado RM, Rocha AMS (2021) Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water

deficit damage in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science** 00, 1–10. <https://doi.org/10.1111/jac.12511>

Tubana BS, Babu T, Datnoff LE (2016) A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture. **Soil Science** 181:393–411. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000179>

Verma KK, Song XP, Zeng Y, Guo DJ, Singh M, Rajput VD, Malviya MK, Wei KJ, Sharma A, Li DP, Chen GL, Li YR (2021) 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** 166:582–592. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.032>

Woesz A, Weaver JC, Kazanci M, Dauphin Y, Aizenberg J, Morse DE, Fratzi P (2006) Micromechanical properties of biological silica in skeletons of deep-sea sponges. **Journal of Materials Research** 21:2068–2078. <https://doi.org/10.1557/jmr.2006.0251>

Yoshida S (1965) Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant. **Bulletin of the National Institute of Agricultural Sciences Series B** 15:1-58.

## **CAPÍTULO 2 - Efeito benéfico do silício aplicado via fertirrigação atenua danos causados pelo déficit hídrico na cana-de-açúcar e na cana-energia**

**RESUMO** - O déficit hídrico limita o estabelecimento de cana-de-açúcar que utiliza mudas pré-brotadas (MPB). O silício (Si) pode mitigar os efeitos da deficiência hídrica, mas não se sabe se o Si aplicado via fertirrigação é eficiente para mitigar os danos causados pelo déficit hídrico por período de até 60 dias após o transplântio da MPB para o campo, nem quais são os mecanismos fisiológicos e bioquímicos envolvidos. O objetivo deste trabalho foi avaliar se o Si aplicado via fertirrigação na fase de produção de MPB de *Saccharum officinarum* L. (cana-de-açúcar) e *S. spontaneum* L. (cana-energia) é eficiente em mitigar os efeitos causados em plantas cultivadas sob déficit hídrico severo por período de 7 até 60 dias após o transplântio, bem como, determinar os mecanismos fisiológicos e bioquímicos envolvidos. Dois experimentos foram desenvolvidos sendo um com cana-de-açúcar e o outro com cana-energia. Os tratamentos consistiram em esquema fatorial 2x2, com ausência (-Si) e presença de Si (+Si) aplicado via fertirrigação (2,5 mmol L<sup>-1</sup>); combinado com dois regimes hídricos: 70% (sem déficit) e 30% (déficit hídrico severo) da capacidade de retenção de água do solo, dispostos em blocos ao acaso com 6 repetições. O déficit hídrico severo por período de até 60 dias após o transplântio diminuiu o conteúdo de água e o potencial hídrico das plantas, induzindo o estresse oxidativo e prejudicando a eficiência fotossintética, com conseqüente diminuição do crescimento das plantas. A fertirrigação mostrou-se eficiente no fornecimento de Si as MPB da cana-de-açúcar e da cana-energia por induzir alto acúmulo do elemento. O efeito residual do Si atenuou os danos causados pelo déficit hídrico por até 60 dias após o transplântio em plantas de ambas as espécies; os mecanismos envolvidos foram relacionados ao sistema de defesa antioxidante com aumento da atividade das enzimas catalase, superóxido dismutase, ascorbato peroxidase e conteúdo de prolina. Além disso, o status hídrico permaneceu estável e, conseqüentemente, houve aumento do crescimento das plantas. Este estudo mostrou que a estratégia baseada no fornecimento de Si aumenta a tolerância de MPB da cana-de-açúcar e da cana-energia ao déficit hídrico após o transplântio, proporcionando maior viabilidade e sustentabilidade desse sistema de produção.

**Palavras-chave:** estresse abiótico, elemento benéfico, estresse oxidativo, nutrição de plantas, *Saccharum officinarum* L., *Saccharum spontaneum* L.

## Beneficial effect of silicon applied through fertigation attenuates damage caused by water deficit in sugarcane

**ABSTRACT** - Water deficit limits the establishment of sugarcane that uses pre-sprouted seedlings (PSS). Silicon (Si) can mitigate the effects of water deficiency, but it is not known whether Si applied via fertigation is efficient to mitigate the damage caused by water deficit for a period of up to 60 days after transplantation of PSS to the field, nor what physiological and biochemical mechanisms are involved. The objective of this study was to evaluate whether Si applied via fertigation in the PSS production phase of *Saccharum officinarum* L. (sugarcane) and *S. spontaneum* L. (energy cane) is efficient in mitigating the effects caused on plants cultivated under severe water deficit for a period of 7 to 60 days after transplantation. Another objective was to determine the physiological and biochemical mechanisms involved. Two experiments were developed, one with sugarcane and the other with energy cane. The treatments consisted of a 2x2 factorial scheme, with absence (-Si) and presence of Si (+Si) applied via fertigation ( $2.5 \text{ mmol L}^{-1}$ ); combined with two water regimes: 70% (no deficit - control) and 30% (severe water deficit) of the soil water retention capacity, arranged in randomized blocks with 6 replications. The severe water deficit for a period of up to 60 days after transplantation decreased the water content and the water potential of plants, inducing oxidative stress and impairing photosynthetic efficiency, with a consequent decrease in plant growth. Fertigation was shown to be efficient to Si supply in the PSS of sugarcane and energy cane, by inducing high accumulation of the element. The residual effect of Si attenuated the damage caused by water deficit for up to 60 days after transplantation in plants of both species; the mechanisms involved were related to the antioxidant defense system with increased activity of the enzymes catalase, superoxide dismutase, ascorbate peroxidase and proline content. In addition, the water status remained stable and, consequently, there was increased plant growth. This study showed that the strategy based on Si supply increases the tolerance of PSS in sugarcane and energy cane to water deficit after transplanting, providing greater viability and sustainability of this production system.

**Keywords:** abiotic stress, beneficial element, oxidative stress, plant nutrition, *Saccharum officinarum* L., *Saccharum spontaneum* L.

## 1 Introdução

A produção global de cana-de-açúcar tem aumentado devido à sua importância como fonte de energia renovável para a produção de álcool e açúcar. Além disso, o setor sucroalcooleiro tem ampliado sua produção para cogeração de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar (*S. officinarum* L.). Mais recentemente, a cana-energia (*S. spontaneum* L.) têm surgido como promissora, pois apresenta maior conversão energética em relação à cana-de-açúcar, devido à sua elevada produção de massa seca por área e maior teor de fibra total (Matsuoka, 2017). No entanto, por serem semiperenes, essas espécies estão comumente expostas a restrições ambientais, como a seca, que é o principal fator abiótico que causa a perda de produtividade das culturas (Basnayake et al., 2012).

A seca na fase de estabelecimento da cultura causa danos severos (Jain et al., 2015), principalmente quando se usa mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas de mini-toletes, pois baixos níveis de nutrientes e reservas de água estão disponíveis para a planta recém-transplantada no campo (Martins et al., 2015). O sistema MPB é uma das maiores inovações do setor sucroalcooleiro, pois permite que os canaviais se formem com melhores condições sanitárias, padronização genética e um arranjo espacial mais homogêneo no campo (Santos et al., 2020). Além disso, aumenta o rendimento da colheita em comparação com o antigo sistema de plantio que usava caules inteiros de plantas. Apesar dessas vantagens, as MPB são muito sensíveis ao déficit hídrico por até 60 dias após o transplantio (Landell et al., 2012), o que pode causar a morte das mudas e falhas no campo.

Uma estratégia para diminuir os danos induzidos pelo déficit hídrico em MPB é o uso de Si, um elemento com potencial para mitigar os efeitos dos estresses bióticos e abióticos, incluindo o déficit hídrico (Epstein, 1999). Os efeitos benéficos do Si em plantas com déficit hídrico podem variar por diversos fatores, como a espécie utilizada e sua fase de crescimento. No entanto, informações sobre os benefícios do Si nos cultivos estão disponíveis apenas para *S. officinarum* L., com aplicação de Si no solo (Camargo et al., 2019; Bezerra et al., 2019). Considerando os efeitos do Si em MPB,

as evidências são ainda mais restritas havendo apenas um estudo de Teixeira et al. (2020), que avaliou o fornecimento de uma solução de Si solúvel. No entanto, os autores avaliaram os efeitos fisiológicos causados pelo déficit hídrico com duração de apenas 30 dias após o transplântio. Além disso, o estudo restringiu-se ao fornecimento de Si apenas na solução nutritiva ou pulverização foliar, mas não avaliou a aplicação combinada com a fertirrigação mais a foliar. A fertirrigação é uma técnica comumente usada para fornecer nutrientes em viveiros de produção de MPB (Landell et al., 2012). Assim, o fornecimento de Si via fertirrigação pode ser uma alternativa interessante em MPB, principalmente porque facilita a inclusão de fontes de Si solúvel em baixas concentrações, diminuindo a possibilidade de polimerização do elemento e aumentando sua absorção (Birchall, 1995).

Assim, os efeitos do Si na formação de MPB são restritos apenas a *S. officinarum* L., e não foi completamente elucidado se os mecanismos de ação desse elemento restringem-se apenas a fisiologia ou se efeitos aditivos de mecanismos bioquímicos também ocorrem. No entanto, para *S. spontaneum* L., até onde sabemos, não há informações sobre o assunto, o que é preocupante tendo em vista o aumento da utilização do sistema MPB na formação de vastas áreas de cultivo de cana-energia e de cana-de-açúcar. Além disso, essas espécies são plantadas em regiões de clima tropical quase o ano todo e, portanto, em alguns meses com baixa pluviosidade; e o Si não é usado na fertilização mineral para plantio.

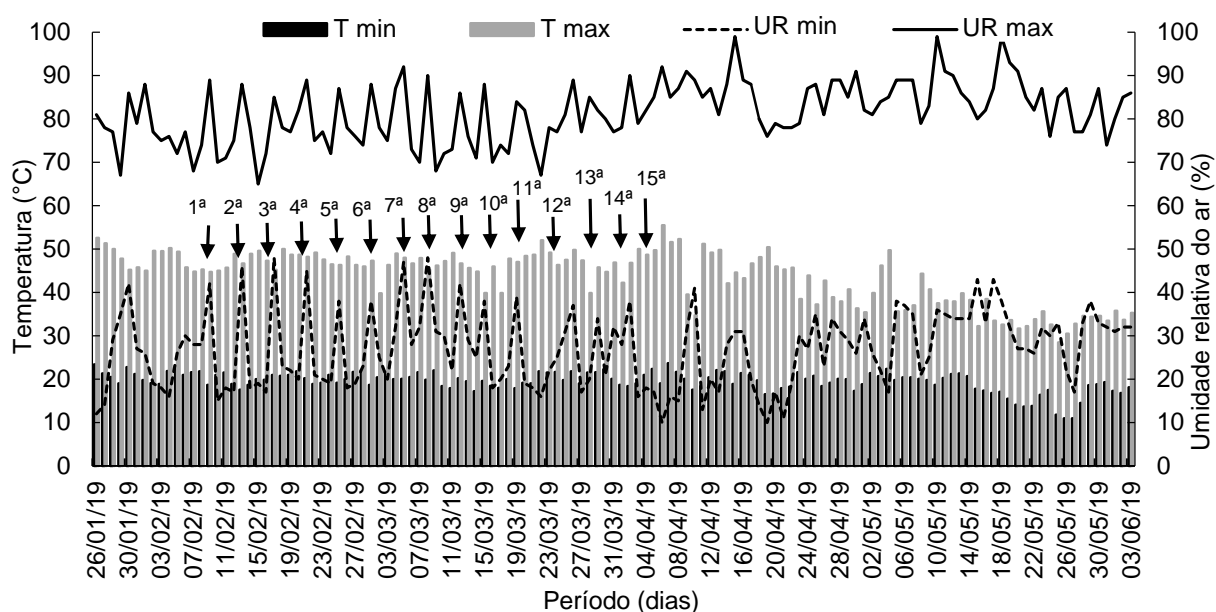
A fim de esclarecer os mecanismos do Si para favorecer o crescimento inicial da cana-de-açúcar e da cana-energia cultivada sob déficit hídrico, hipotetizou-se que (i) inicialmente, a absorção ótima de Si na formação de MPB pode promover um efeito residual na atenuação dos causados pelo déficit hídrico com duração de até 60 dias após o transplântio para o solo. (ii) Este efeito do Si se deve à melhoria fisiológica induzida pelo aumento da atividade antioxidante, que diminui o estresse e favorece o acúmulo de biomassa nessas plantas. Para tanto, o presente estudo teve como objetivo avaliar se o Si aplicado via fertirrigação e foliar em MPB de cana-de-açúcar e cana-energia é eficiente em mitigar os danos causados pelo déficit hídrico severo com duração de 7 até 60 dias após o transplântio, bem como, elucidar os mecanismos fisiológicos e bioquímicos envolvidos.

## 2 Material e métodos

### 2.1 Material vegetal e condições de crescimento

Dois experimentos foram realizados em casa de vegetação da UNESP Câmpus de Jaboticabal, de janeiro a julho de 2019, utilizando MBP de duas espécies: *S. officinarum* L. (cana-de-açúcar - variedade RB 966928) e *S. spontaneum* L. (cana-de-açúcar - variedade VX2). A variedade de cana-energia utilizada foi obtida da Vignis®, sendo classificada como tipo II pela produção de alto teor de fibra (>28%) e baixo teor de açúcar na forma de sacarose (<6%) (Matsuoka et al., 2014).

Os experimentos foram desenvolvidos em duas etapas: uma na fase de formação das mudas, que consistiu no fornecimento de Si e outra após o transplântio, com imposição de regimes de água no solo. Os dados de temperatura e umidade relativa no interior da casa de vegetação foram registrados diariamente com o auxílio de um termohigrômetro (U23-001, Sigma Sensors, Brasil) (Figura 1).



**Figura 1.** Temperatura máxima (T max) e mínima (T min) e umidade relativa máxima (UR max) e mínima (UR min) do ar na casa de vegetação durante o período do experimento. As setas indicam as datas de aplicação de silício.

## 2.2 Tratamentos e delineamento experimental

Em ambos os experimentos, os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial 2 x 2; o primeiro fator consistiu no fornecimento de Si: ausência (-Si) e presença de Si (+Si) aplicado via fertirrigação e foliar, e o segundo fator consistiu em dois regimes hídricos no solo: 70% (regime hídrico adequado - controle) e 30% (déficit hídrico severo - DH) da capacidade de retenção de água no solo (CRA). O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com seis repetições.

Inicialmente, mini-colmos foram plantados em bandejas de produção de mudas preenchidas com vermiculita fina. A solução nutritiva utilizada foi a de Hoagland e Arnon (1950) com alteração da concentração de ferro para  $368 \mu\text{mol L}^{-1}$  e na fonte para Fe-EDDHA, conforme indicado por Cavalcante et al. (2016). Para evitar a salinização do substrato, a concentração da solução nutritiva durante a primeira semana de cultivo foi mantida na diluição de 25% e aumentada para 50% na segunda semana até o final do experimento. O volume de solução aplicado foi definido a partir de um teste preliminar de saturação do substrato, evitando perda por lixiviação, e a aplicação de 10 mL por muda com seringa foi considerada ideal. O valor do pH da solução foi ajustado para  $5,5 \pm 0,2$  com o uso de solução de ácido clorídrico (HCl) ou hidróxido de sódio (NaOH) - ambos a  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ .

O Si foi usado em uma concentração de  $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$  porque o elemento em solução começa a polimerizar com concentração de  $3,0 \text{ mmol L}^{-1}$  ou superior (Birchall, 1995). A fonte de Si solúvel foi o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol ( $113,4 \text{ g L}^{-1}$  de Si e  $18,9 \text{ g L}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  e pH 11,8). Foram realizadas 15 fertirrigações de Si em intervalos de 4 dias, iniciando 10 dias após a completa emergência dos brotos (DAE) (Figura 1), com aplicação de 10 mL por muda via substrato e 1,47 mL por muda via pulverização foliar com pulverizador manual. O valor de pH da solução fertirrigada de Si foi ajustado para  $5,5 \pm 0,2$ . A quantidade de potássio presente na fonte de Si ( $15,7 \text{ g L}^{-1}$  de K) foi balanceada nos tratamentos sem o elemento, utilizando-se solução de cloreto de potássio  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  com aplicação radicular e pulverização foliar.

Previamente ao transplante, foi realizada a análise química do solo para fins de fertilidade, de acordo com o método descrito por Raij et al. (2001). Os seguintes

resultados foram encontrados: pH (CaCl<sub>2</sub>): 4,3, matéria orgânica: 9,0 g dm<sup>-3</sup>, P (res): 2 mg dm<sup>-3</sup>, B: <0,12 mg dm<sup>-3</sup>, Cu: 0,2 mg dm<sup>-3</sup>, Fe: 9,0 mg dm<sup>-3</sup>, Mn: 1,7 mg dm<sup>-3</sup>, Zn: 0,4 mg dm<sup>-3</sup>, Ca: 3,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, Mg: 1,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, K: 0,3 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, H + Al: 16,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, soma de bases (SB): 4,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, capacidade de troca catiônica (CTC): 20,3 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e saturação de base (V:SBx100/CTC): 21,0%. O teor de Si foi de 1,0 mg dm<sup>-3</sup>, determinado pelo uso de cloreto de cálcio a 0,01 mol L<sup>-1</sup> como extrator de acordo com o método de Korndörfer et al. (2004).

Foi realizada aplicação de calcário (poder relativo de neutralização total: 125%, CaO: 48%, MgO: 16%) para elevar o V a 60%, sendo devidamente misturado com o volume do solo. Trinta dias após a calagem, a fertilização foi aplicada ao solo com 150 mg dm<sup>-3</sup> de N, P e K como sulfato de amônio, superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente. O superfosfato triplo foi aplicado em dose única e incorporado ao volume do solo. O sulfato de amônio e cloreto de potássio foram aplicados via fertirrigação em três doses de 50 mg dm<sup>-3</sup> em intervalos de sete dias. Foi realizada também a aplicação de 5 mg dm<sup>-3</sup> de Zn na forma de sulfato de zinco e 2 mg dm<sup>-3</sup> de B na forma de ácido bórico, em dose única, na primeira aplicação dos fertilizantes N e K, via fertirrigação.

Após a aplicação de Si, aos 70 DAE, as mudas foram transplantadas para vasos de 7,0 dm<sup>3</sup> preenchidos com 5,5 dm<sup>3</sup> de amostras de Neossolo Quartzarênico (Santos et al., 2018) coletadas no horizonte superficial (Ap). No transplântio, as mudas apresentavam seis folhas totalmente desenvolvidas e foi realizado um corte a 30 cm da bainha da última folha totalmente desenvolvida, ou seja, quase um terço das folhas foram retiradas. Essa é uma prática comum em viveiros de mudas com o objetivo de diminuir a perda de vapor d'água pela transpiração após o transplântio para o solo. Após sete dias do transplântio, as mudas foram submetidas aos regimes de água no solo por um período de até 60 dias.

Os regimes hídricos do solo foram determinados com base nos valores de microporosidade encontrados pelo método da mesa de tensão com coluna d'água de 60 cm. Para isso, foram coletadas amostras indeformadas de solo em anel volumétrico (V: 98,125 cm<sup>3</sup>), posteriormente saturado por 24 h, e colocado na mesa de tensão por 72 h, sendo então determinada a massa (a); em seguida, as amostras foram secas

em estufa a 110°C por 24 h e novamente determinada a massa (b). O valor da microporosidade total ( $M_i$ ):  $((a-b)/V)$  foi equivalente a 100% da CRA (Embrapa, 1997).

No entanto, a condição ideal da água foi de 70% desse valor, pois permite que 70% dos microporos sejam preenchidos com água disponível e os 30% restantes com ar, mantendo a troca gasosa das raízes (Boaretto et al., 2014). Assim, os regimes hídricos no solo foram: regime hídrico adequado - controle (70% de CRA) e déficit hídrico severo - DH (30% de CRA), conforme indicado por Teixeira et al. (2020) para MPB de cana-de-açúcar. A disponibilidade de água foi controlada diariamente pesando os vasos para repor a água evapotranspirada.

Aos 60 dias após o transplântio das mudas para os vasos com solo, as plantas foram avaliadas conforme descrito a seguir:

## **2.3 Parâmetros avaliados**

### **2.3.1 Eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm)**

As medidas fotossintéticas da eficiência quântica do fotossistema II (PSII) foram realizadas na primeira folha completamente desenvolvida usando um fluorômetro portátil no período entre 7 e 8 h da manhã (Os30P +, Opti-Sciences Inc., EUA) (Lichtenthaler et al., 2005).

### **2.3.2 Índice de extravasamento de eletrólitos (IEE)**

Dez discos de folhas (26,4 mm<sup>2</sup> cada) foram coletados da primeira folha completamente desenvolvida e emergidos em água deionizada por 2 h. A condutividade elétrica ( $EC_1$ ) da solução foi determinada usando um medidor de condutividade (AK51, Akso, Brasil). As amostras foram autoclavadas a 121°C por 20 min, e a condutividade elétrica final ( $EC_2$ ) foi determinada após o resfriamento. O índice de extravasamento de eletrólitos foi calculado considerando a fórmula:  $EC_1/EC_2 \times 100$  (Dionisio-Sese e Tobita, 1998).

### **2.3.3 Potencial hídrico na folha ( $\Psi_w$ )**

O potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) foi determinado no terço médio da lâmina da segunda folha completamente desenvolvida por meio do uso de uma câmara de pressão de Scholander (3000F01, Soil Moisture Equipment, EUA). A pressão foi

aplicada até que ocorresse a exsudação no local do corte feito no pecíolo da folha. As medições foram avaliadas entre 5 e 6 h da manhã (Turner, 1981).

#### **2.3.4 Conteúdo de prolina**

O conteúdo de prolina livre foi determinado em amostras da terceira folha completamente desenvolvida pela reação de nihidrina, seguindo o método proposto por Bates et al. (1973). A concentração de prolina foi determinada realizando leitura a 520 nm em espectrofotômetro (DU640, Beckman, EUA) sendo estimada por meio de uma curva padrão.

#### **2.3.5 Peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)**

O teor de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) foi determinado a partir da reação com iodeto de potássio, seguindo o método de Alexieva et al. (2001). A leitura do material foi realizada em espectrofotômetro (DU640, Beckman, EUA) a 390 nm, e o teor de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> determinado por meio de curva padrão.

#### **2.3.6 Peroxidação lipídica (MDA)**

A peroxidação lipídica foi determinada pela estimativa do conteúdo de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico, conforme descrito por Heath e Packer (1968). A concentração de malondialdeído (MDA) foi determinada em espectrofotômetro (DU640, Beckman, EUA) a 535 e 600 nm. Os dados foram calculados usando um coeficiente de extinção de  $1,55 \times 10^{-5} \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  (Gratão et al., 2012).

#### **2.3.7 Enzimas antioxidantes**

Para a análise enzimática, os extratos proteicos foram inicialmente obtidos conforme descrito por Gomes-Junior et al. (2007). Para tal, o tecido foliar foi macerado em N<sub>2</sub> líquido e homogeneizado em tampão fosfato de potássio contendo ácido etilenodiaminotetracético, ditiotreitól e polivinilpirrolidona. O homogenato foi centrifugado e o sobrenadante armazenado em alíquotas a -80°C. A concentração de proteínas totais foi determinada de acordo com o método de Bradford (1976).

#### **2.3.7.1 Catalase (CAT, EC 1.11.1.6)**

A atividade da catalase foi determinada usando extratos proteicos com o método descrito por Kraus et al. (1995) e as modificações de Azevedo et al. (1998), monitorando a degradação de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> em espectrofotômetro a 240 nm por 1 min.

#### **2.3.7.2 Superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1)**

A atividade da superóxido dismutase foi determinada de acordo com Giannopolitis e Ries (1977), com base na medida da inibição da redução fotoquímica do cloreto de nitro azul tetrazólio, realizada em câmara de reação iluminada por lâmpada fluorescente de 15W a 25°C. A medição foi realizada em espectrofotômetro a 560 nm.

#### **2.3.7.3 Ascorbato peroxidase (APX, EC 1.11.1.11)**

A atividade da peroxidase do ascorbato foi determinada monitorando a taxa de oxidação do ascorbato em espectrofotômetro a 290 nm, seguindo o método descrito por Moldes et al. (2008).

#### **2.3.8 Conteúdo relativo de água**

Foram coletados dez discos (26,4 mm<sup>2</sup>) da primeira folha completamente desenvolvida e imediatamente pesados para determinação da massa fresca (Mf). Posteriormente, as amostras foram reidratadas em água deionizada por 6 h para obtenção de massa túrgida (Mt) e secas em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, Brasil) a 80°C por 24 h, para determinação da massa seca (Ms). Os valores foram determinados pela equação proposta por Barrs e Weatherley (1962):  $[(Mf-Ms)/(Mt-Ms)] \times 100$ .

#### **2.3.9 Altura do colmo, diâmetro do colmo, número de folhas, número de perfilhos e área foliar**

A altura do colmo foi medida considerando da base até a inserção da primeira folha totalmente desenvolvida. O diâmetro do colmo foi medido a 5 cm da base da planta. O número de folhas e perfilhos foi determinado por contagem. A área foliar foi medida com um medidor de área foliar (L-3100, LiCor, EUA).

### 2.3.10 Produção de massa seca

As plantas foram separadas em folhas, colmos, raízes e perfilhos, posteriormente lavadas em água corrente com solução detergente (0,1% v/v), solução de HCl (0,3% v/v) e água deionizada. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, Brasil) ( $65\pm 5^{\circ}\text{C}$ ) até a massa constante, a fim de se obter os valores de massa seca de cada parte da planta.

### 2.3.11 Análise de silício (Si)

O teor de Si foi determinado pela extração do elemento de acordo com a metodologia descrita por Kraska e Breitenbeck (2010) e a leitura foi realizada em espectrofotômetro (B442, Micronal, Brasil) a 410 nm, conforme indicado por Korndörfer et al. (2004). O acúmulo de Si foi determinado nas folhas, colmos e raízes sendo calculado com base no teor de Si de cada parte e sua respectiva massa seca.

## 2.4 Análise estatística

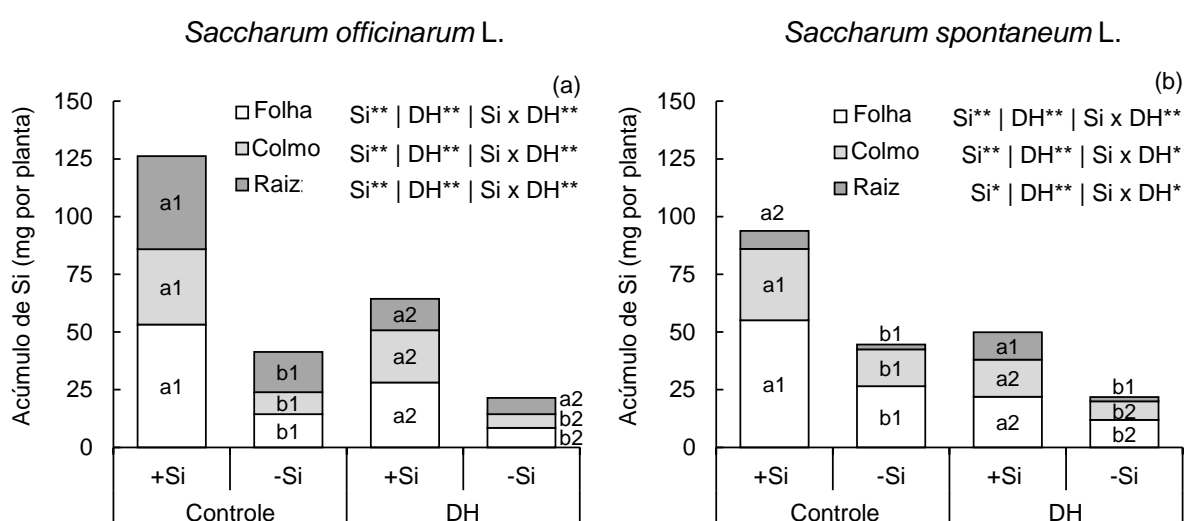
Os experimentos foram analisados de forma independente entre as espécies. Para normalizar a variância, os dados percentuais do índice de extravasamento de eletrólitos e do conteúdo relativo de água foram transformados para o arco seno =  $\sqrt{x} / 100$ . Os dados foram submetidos à análise de variância bidirecional (ANOVA) pelo teste F ( $p < 0,05$ ) após atender às premissas de normalidade (teste W de Shapiro-Wilks) e homogeneidade de variâncias (teste de Bartlett). A análise fatorial foi utilizada para testar os principais efeitos do suprimento de silício (Si) e do regime de água no solo (DH) e suas interações (Si  $\times$  DH), onde  $N$  foi de 24 unidades experimentais, em cada experimento. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade por meio do software estatístico SAS® (Cary, NC, EUA).

## 3 Resultados

A interação entre os fatores (Si  $\times$  DH) foi significativa para o acúmulo de Si nas folhas ( $p < 0,0001$ ), colmos ( $p < 0,01$ ) e raízes ( $p < 0,01$ ) para *S. officinarum* L. (cana-de-açúcar), e nas folhas ( $p < 0,01$ ), colmos ( $p < 0,05$ ) e raízes ( $p < 0,05$ ) para *S. spontaneum* L. (cana-energia). O fornecimento de Si via fertirrigação e foliar promoveu aumento no acúmulo do elemento nos dois regimes hídricos do solo, tanto na cana-de-açúcar

quanto na cana-energia. Nas plantas fertilizadas com Si, a quantidade acumulada variou de acordo com as partes da planta, na seguinte ordem: folhas > raízes > colmos, na cana-de-açúcar. Na cana-energia, a ordem de acúmulo nos tecidos da planta foi: folhas > colmos > raízes (Figura 2a-b).

Na ausência de Si, o déficit hídrico diminuiu o acúmulo desse elemento nas folhas, colmos e raízes da cana-de-açúcar (Figura 2a) e nas folhas e colmos da cana-energia (Figura 2b), em comparação ao tratamento sem déficit hídrico.

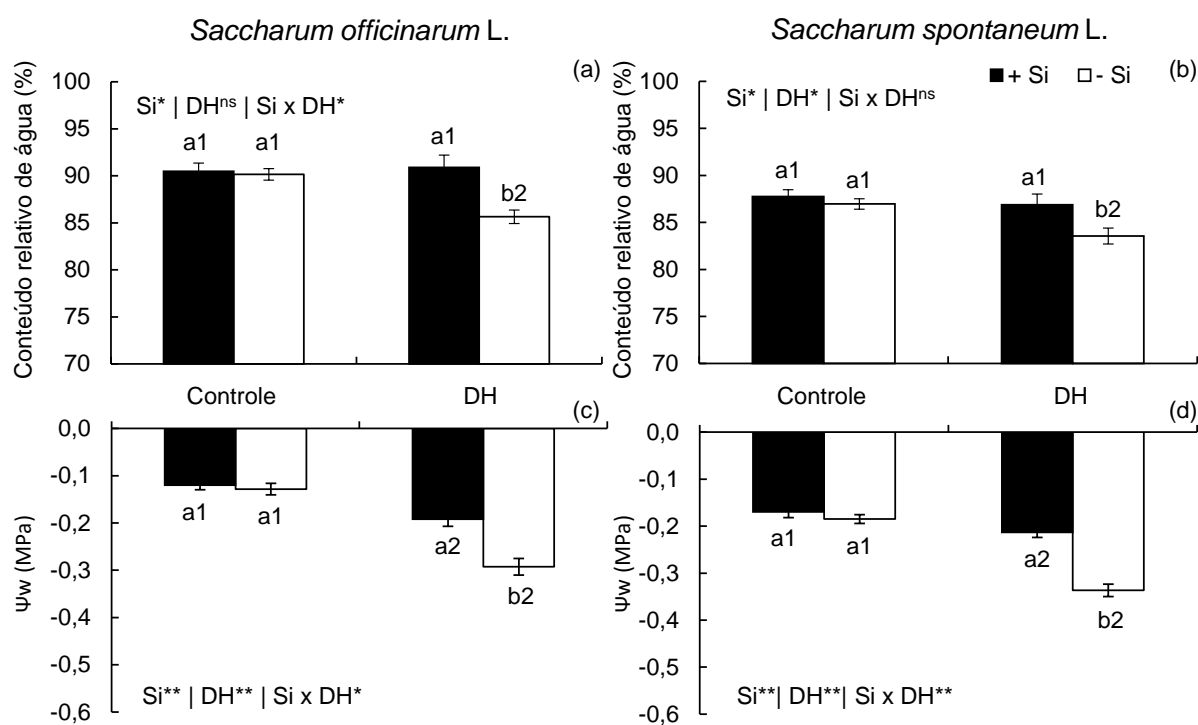


**Figura 2.** Acúmulo de silício (Si) nas folhas, colmos e raízes em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a) e de cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b) com Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) e ausência de Si (-Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH). \*\* e \*: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. Letras diferentes indicam diferenças em Si no mesmo regime de água; e números diferentes em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si pelo teste de Tukey;  $n = 6$ .

A interação entre os fatores (Si  $\times$  DH) foi significativa para o conteúdo de água da cana-de-açúcar ( $p < 0,05$ ), enquanto na cana-energia os fatores isolados de Si e DH foram significativos (ambos com  $p < 0,05$ ) e a interação (Si  $\times$  DH) não foi significativa ( $p = 0,2103$ ). Em ambas as espécies, o conteúdo de água no tecido foliar diminuiu com o déficit hídrico nas plantas não fertilizadas com Si, quando comparado ao tratamento com condição hídrica adequada. O fornecimento de Si nas mudas aumentou o

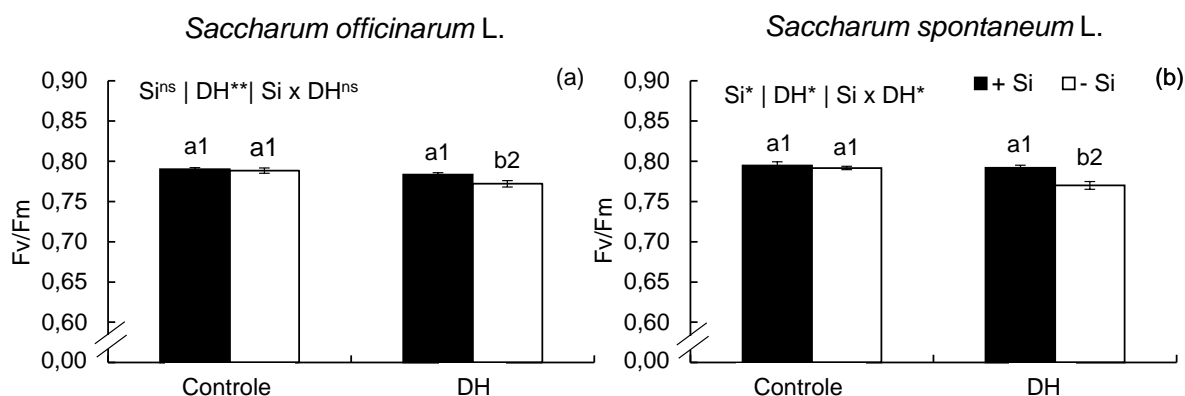
conteúdo de água no tecido foliar de plantas com déficit hídrico, em comparação com a ausência de Si. Este resultado é semelhante ao encontrado no tratamento com plantas sem déficit hídrico na cana-de-açúcar (Figura 3a) e na cana-energia (Figura 3b).

A interação entre os fatores (Si × DH) foi significativa para  $\Psi_w$  na cana-de-açúcar ( $p < 0,05$ ) e cana-energia ( $p < 0,01$ ). O  $\Psi_w$  diminuiu com o déficit hídrico, principalmente nas plantas que não receberam Si na fase de produção de mudas. Porém, a inclusão de Si no cultivo de mudas antes do transplante manteve o potencial hídrico foliar maior quando comparado à ausência de Si, sob déficit hídrico em ambas as espécies (Figura 3c-d).



**Figura 3.** Conteúdo relativo de água e potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c) e de cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d) com Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) e ausência de Si (-Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH). \*\* e \*: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente; <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras diferentes indicam diferenças em Si no mesmo regime de água; e números diferentes em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si pelo teste de Tukey. As barras representam o erro padrão da média;  $n = 6$ .

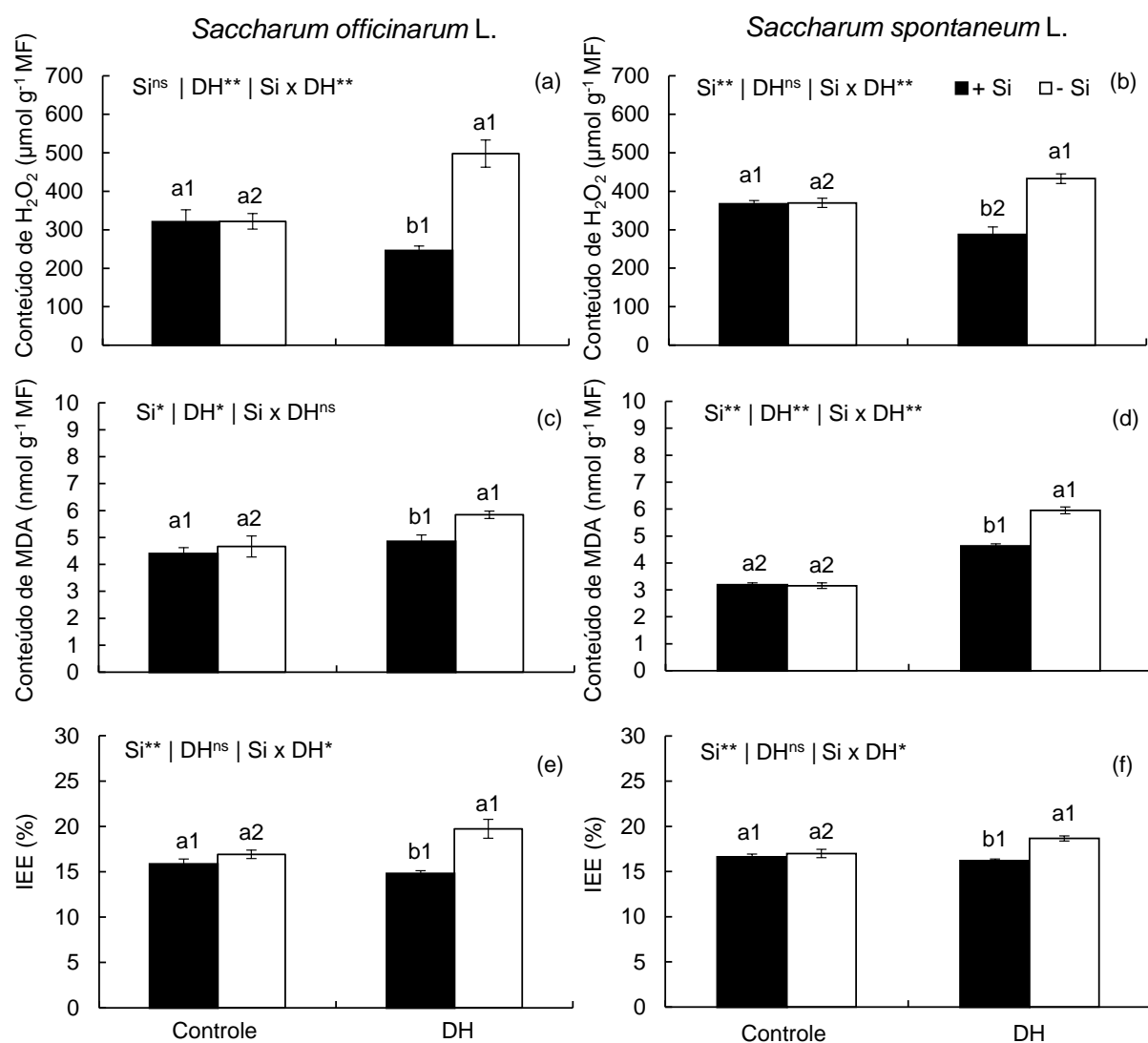
Na cana-de-açúcar, a interação entre os fatores (Si x DH) não foi significativa ( $p=0,1803$ ), mas o fator isolado DH foi significativo ( $p<0,01$ ) para a eficiência quântica do PSII - expressa pelos valores de Fv/Fm – e, na cana-energia a interação entre os fatores (Si x DH) foi significativa ( $p<0,05$ ) para esta variável. Os valores de Fv/Fm nas plantas de cana-de-açúcar e cana-energia que não receberam Si foram diminuídos em caso de déficit hídrico, quando comparados com plantas com umidade adequada. A presença de Si preservou a eficiência fotoquímica, demonstrada pelos maiores valores de Fv/Fm em comparação às plantas cultivadas sem Si, em regime de déficit hídrico. O Si fornecido via fertirrigação e foliar manteve uma taxa de eficiência fotoquímica semelhante, independentemente do regime hídrico no solo, para a cana-de-açúcar (Figura 4a) e para a cana-energia (Figura 4b).



**Figura 4.** Eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm) em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a) e de cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b) com Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) e ausência de Si (-Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH). \*\* e \*: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente; ns: não significativo pelo teste F. Letras diferentes mostram diferenças em Si no mesmo regime de água; e números diferentes em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si pelo teste de Tukey. As barras representam o erro padrão da média;  $n = 6$ .

A concentração de  $H_2O_2$  teve efeito significativo na interação entre os fatores (Si x DH) para cana-de-açúcar ( $p<0,01$ ) e cana-energia ( $p<0,01$ ). As duas espécies cultivadas sob déficit hídrico sem adição de Si apresentaram as maiores concentrações de  $H_2O_2$ . No entanto, o fornecimento de Si diminuiu a concentração de  $H_2O_2$  em comparação às plantas cultivadas na ausência do elemento, sendo até

semelhante ao valor encontrado nas plantas do tratamento controle (70% de CRA) na cana-de-açúcar (Figura 5a), mas foi menor no caso da cana-energia (Figura 5b).

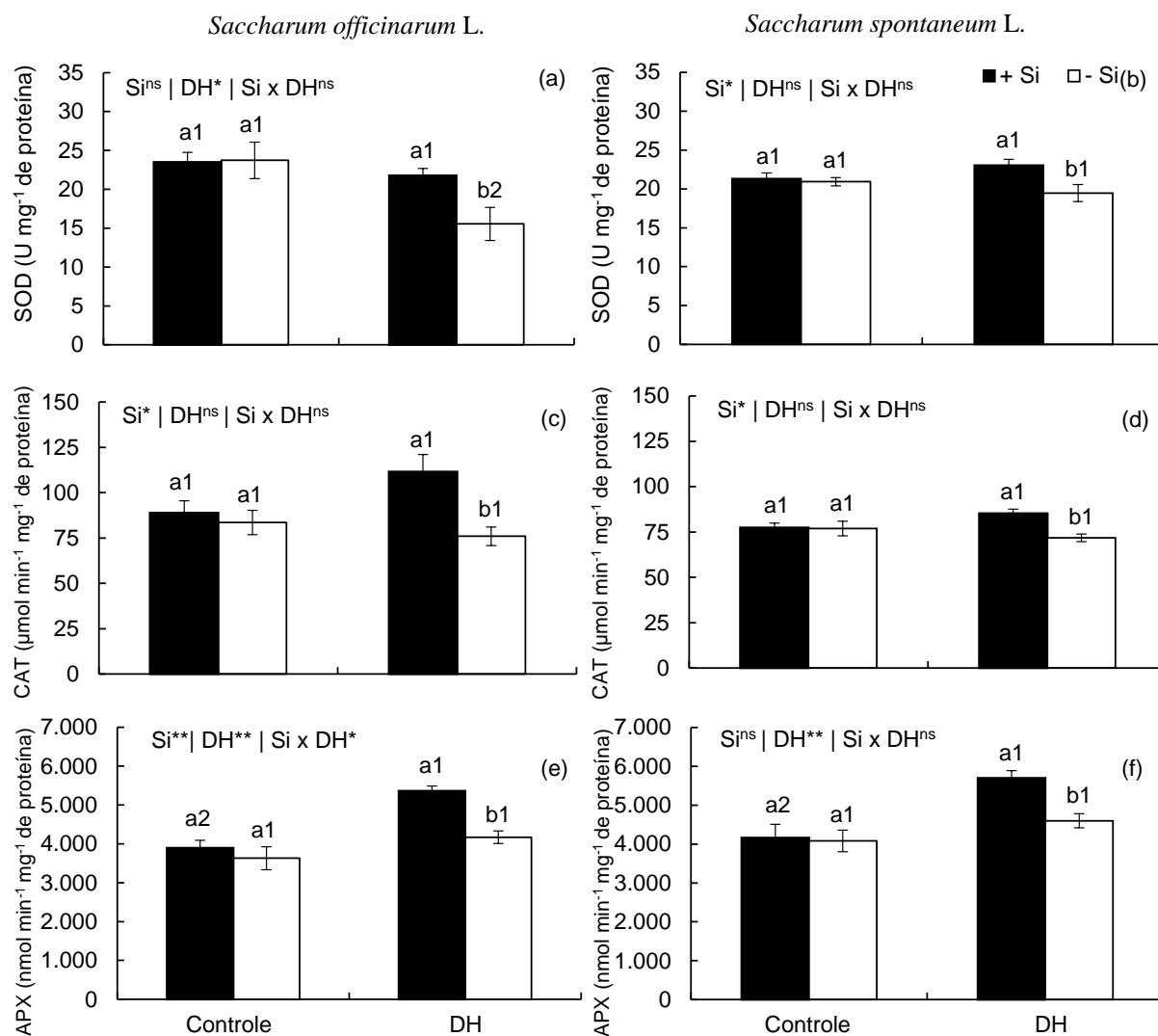


**Figura 5.** Conteúdo de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), conteúdo de malondialdeído (MDA) e índice de extravasamento de eletrólitos celulares (IEE) em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c, e) e de cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d, f) com Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) e ausência de Si (-Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH). \*\* e \*: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente; <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras diferentes indicam diferenças em Si no mesmo regime de água; e números diferentes em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si pelo teste de Tukey. As barras representam o erro padrão da média;  $n = 6$ . MF = massa fresca.

Na cana-de-açúcar, para a peroxidação lipídica - expressa em conteúdo de MDA - apenas os fatores isolados de Si ( $p < 0,05$ ) e DH ( $p < 0,05$ ) foram significativos, e a interação Si x DH não foi significativa ( $p = 0,2547$ ). Mas para a cana-energia, a interação entre os fatores (Si x DH) foi significativa ( $p < 0,0001$ ). As maiores taxas de peroxidação lipídica nas folhas das duas espécies foram encontradas nos tratamentos com déficit hídrico, principalmente sem adição de Si (Figura 5c-d). A aplicação de Si na fase de formação das mudas de ambas as espécies proporcionou efeito residual suficiente para diminuir o conteúdo de MDA quando as mudas foram submetidas ao déficit hídrico. O efeito do Si foi mais evidente na cana-de-açúcar: o conteúdo de MDA em mudas com déficit hídrico não diferiu do conteúdo em mudas cultivadas sob umidade adequada (Figura 5c).

A interação entre os fatores (Si x DH) foi significativa para o IEE em cana-de-açúcar ( $p < 0,05$ ) e cana-energia ( $p < 0,05$ ). Na ausência de Si, o índice de extravasamento de eletrólitos celulares das duas espécies aumentou com o déficit hídrico. Porém, quando essas plantas receberam suprimento de Si via fertirrigação e foliar, esse índice diminuiu, sendo semelhante ao encontrado no tratamento sem déficit hídrico em ambas as espécies (Figura 5e-f).

A atividade da SOD teve efeito apenas do fator isolado DH na cana-de-açúcar ( $p < 0,05$ ), e do fator isolado Si na cana-energia ( $p < 0,05$ ), sendo as interações entre os fatores (Si x DH) não significativas para a cana-de-açúcar ( $p = 0,1352$ ) e cana-energia ( $p = 0,1048$ ). A atividade da SOD diminuiu com o déficit hídrico em plantas que não receberam fertilização com Si apenas na cana-de-açúcar (Figura 6a). Porém, quando essas plantas receberam a aplicação de Si, houve maior atividade dessa enzima nas duas espécies em déficit hídrico; como resultado, a atividade da SOD foi semelhante à do controle (Figura 6a-b).

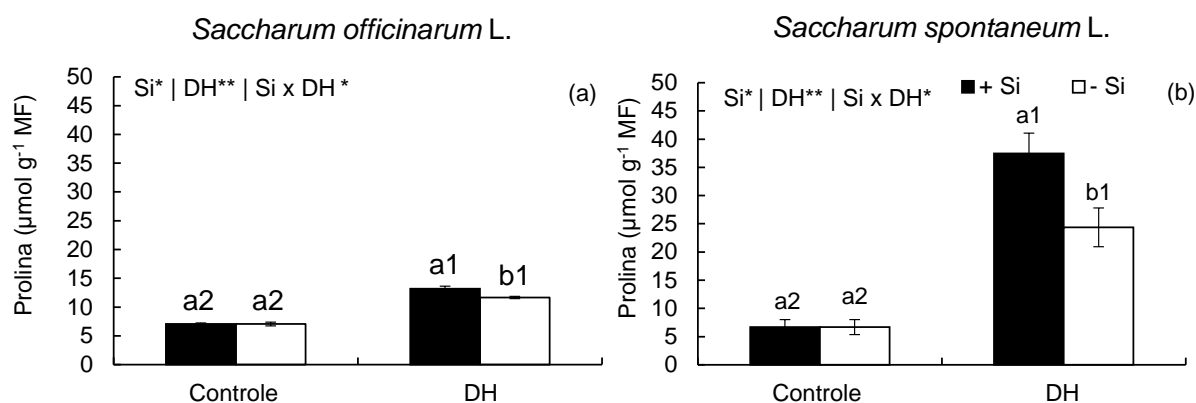


**Figura 6.** Atividade específica da superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c, e) e de cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d, f) com Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) e ausência de Si (-Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH). \*\* e \*: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente; <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras diferentes indicam diferenças em Si no mesmo regime de água; e números diferentes em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si pelo teste de Tukey. As barras representam o erro padrão da média;  $n = 6$ .

Para a atividade da CAT, apenas o fator isolado Si teve efeito significativo na cana-de-açúcar ( $p < 0,05$ ) e na cana-energia ( $p < 0,05$ ), sendo as interações (Si x DH) não significativas para cana-de-açúcar ( $p = 0,0888$ ) e cana-energia ( $p = 0,0656$ ). No

regime de déficit hídrico, a CAT mostrou maior atividade em plantas que receberam Si em ambas as espécies de estudo (Figura 6c-d). A atividade APX teve efeito significativo da interação entre os fatores (Si x DH) na cana-de-açúcar ( $p < 0,05$ ), e apenas do fator isolado DH ( $p < 0,01$ ) com a interação (Si x DH) não significativa ( $p = 0,1099$ ) na cana-energia. A atividade do APX também aumentou em plantas de cana-de-açúcar e cana-energia submetidas ao déficit hídrico após o transplante, principalmente com fertilização com Si, em comparação com as plantas cultivadas sem déficit hídrico (Figura 6e-f).

A interação entre os fatores (Si x DH) foi significativa para o conteúdo de prolina na cana-de-açúcar ( $p < 0,05$ ) e na cana-energia ( $p < 0,05$ ). O conteúdo de prolina aumentou com o déficit hídrico na ausência e presença de Si em ambas as espécies. O Si aplicado na fase de produção de mudas proporcionou um efeito residual que aumentou o conteúdo de prolina nas plantas submetidas ao regime de déficit hídrico, em comparação com a ausência de Si (Figura 7a-b).



**Figura 7.** Conteúdo de prolina em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a) e de cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b) com Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) e ausência de Si (-Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH). \*\* e \*: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. Letras diferentes indicam diferenças em Si no mesmo regime de água; e números diferentes, em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si pelo teste de Tukey. As barras representam o erro padrão da média;  $n = 6$ . MF = massa fresca.

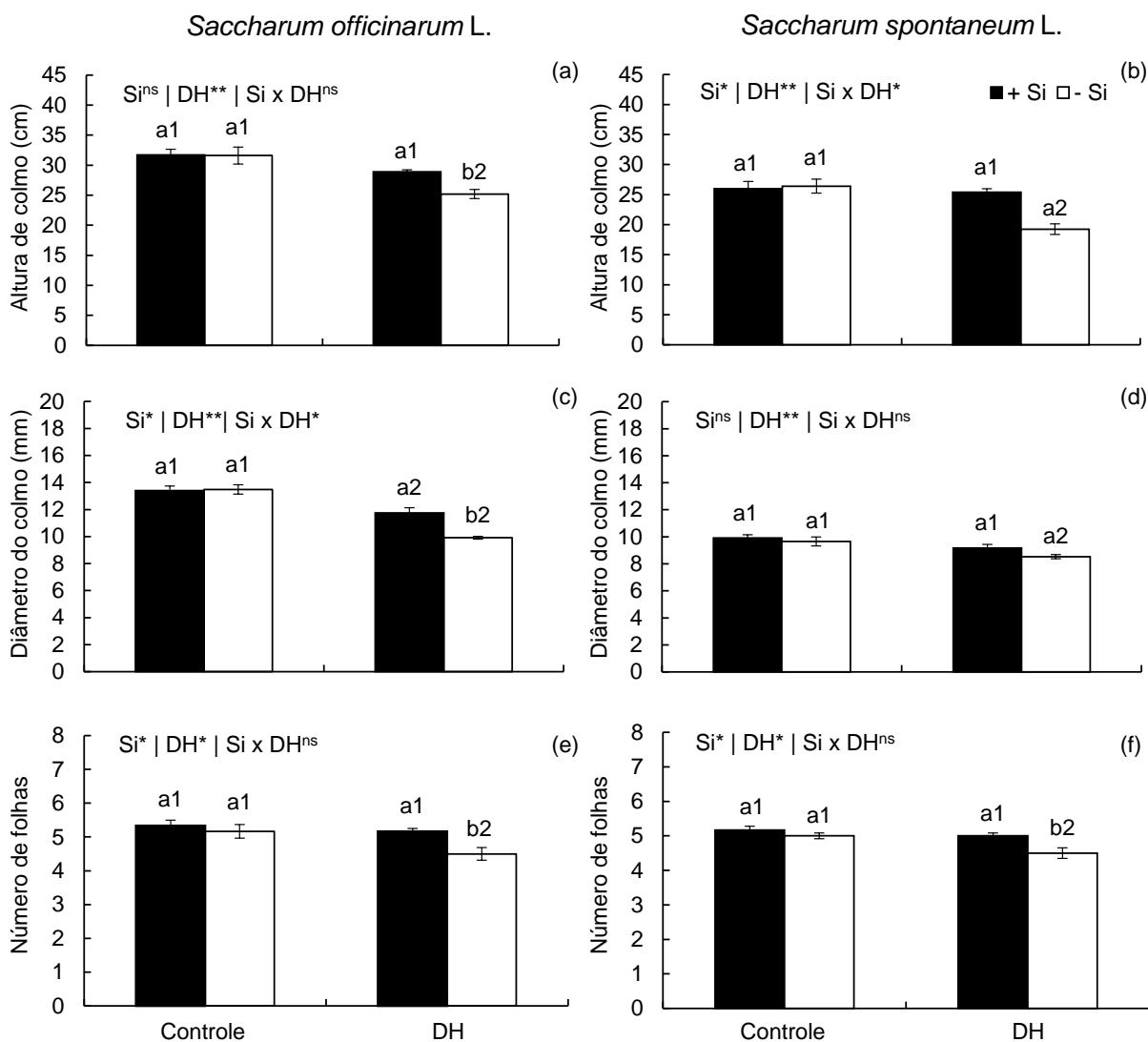
Na cana-de-açúcar, apenas o fator isolado DH teve efeito significativo para a altura do colmo ( $p < 0,01$ ), sendo as interações entre os fatores (Si x DH) não significativas ( $p = 0,1240$ ). Na cana-energia, essa variável teve efeito significativo da interação entre os fatores (Si x DH) ( $p < 0,05$ ). Na ausência de Si, o regime de déficit hídrico no solo diminuiu a altura do colmo em ambas as espécies (Figura 8a-b). No entanto, a nutrição com este elemento proporcionou um efeito benéfico que diminuiu as perdas na altura do colmo de plantas sob déficit hídrico, com valores semelhantes aos encontrados em plantas cultivadas a 70% da CRA em cana-de-açúcar (Figura 8a) e cana-energia (Figura 8b).

O diâmetro do colmo teve efeito significativo da interação entre os fatores (Si x DH) na cana-de-açúcar ( $p < 0,05$ ). Na cana-energia, houve efeito significativo do fator isolado DH ( $p < 0,01$ ), sendo a interação entre os fatores (Si x DH) não significativa ( $p = 0,5434$ ). O diâmetro do colmo diminuiu com o déficit hídrico no solo, principalmente nas plantas que não receberam Si. Com a fertilização com Si, houve menos danos relativos às perdas no diâmetro do colmo em comparação com a ausência de Si, na condição de déficit hídrico em ambas as espécies (Figura 8c-d). Na cana-energia, a nutrição com Si manteve o diâmetro do colmo igual ao valor encontrado nas plantas cultivadas na condição de umidade adequada do solo (Figura 8d).

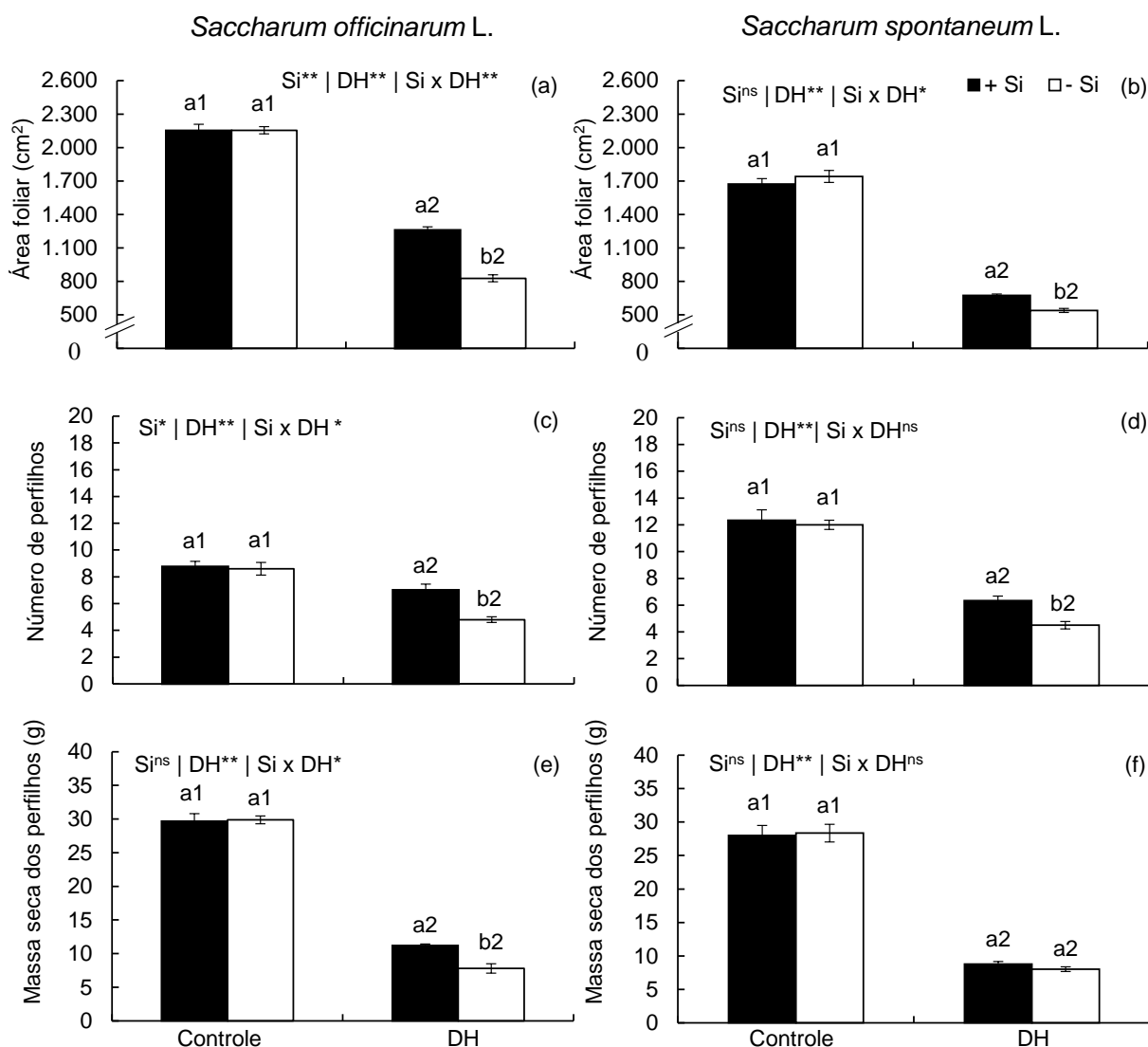
O número de folhas sofreu efeito significativo dos fatores isolados Si e DH, com  $p < 0,05$  para cana-de-açúcar e para cana-energia em ambos os fatores. A interação entre os fatores (Si x DH) não foi significativa para cana-de-açúcar ( $p = 0,2108$ ) e para cana-energia ( $p = 0,2162$ ). Na ausência de Si, o número de folhas diminuiu com o regime de déficit hídrico, mas a fertirrigação associada com a pulverização foliar de Si aumentou o número de folhas nas plantas, que foi até semelhante à quantidade encontrada em plantas com umidade adequada em ambas as espécies (Figura 8e-f).

A interação entre os fatores (Si x DH) foi significativa para a área foliar da cana-de-açúcar ( $p < 0,01$ ) e da cana-energia ( $p < 0,05$ ). A área foliar também diminuiu com o déficit hídrico no solo em ambas as espécies (Figura 9a-b). A adição de Si nas mudas em comparação com sua ausência aumentou a área foliar em 52% e 25% para a cana-de-açúcar e cana-energia, respectivamente. O número de perfilhos teve efeito significativo da interação entre os fatores (Si x DH) na cana-de-açúcar ( $p < 0,05$ ), e

apenas do fator isolado DH ( $p < 0,0001$ ) com a interação entre os fatores (Si x DH) não significativo ( $p = 0,1984$ ) na cana-energia. O número de perfilhos também foi menor no regime de déficit hídrico e houve maior perfilhamento nas plantas que receberam Si na cana-de-açúcar (Figura 9c) e na cana-energia (Figura 9d).



**Figura 8.** Altura do colmo, diâmetro do colmo e número de folhas em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c, e) e de cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d, f) com Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) e ausência de Si (-Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH). \*\* e \*: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente; ns: não significativo pelo teste F. Letras diferentes indicam diferenças em Si no mesmo regime de água; e números diferentes em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si pelo teste de Tukey. As barras representam o erro padrão da média;  $n = 6$ .

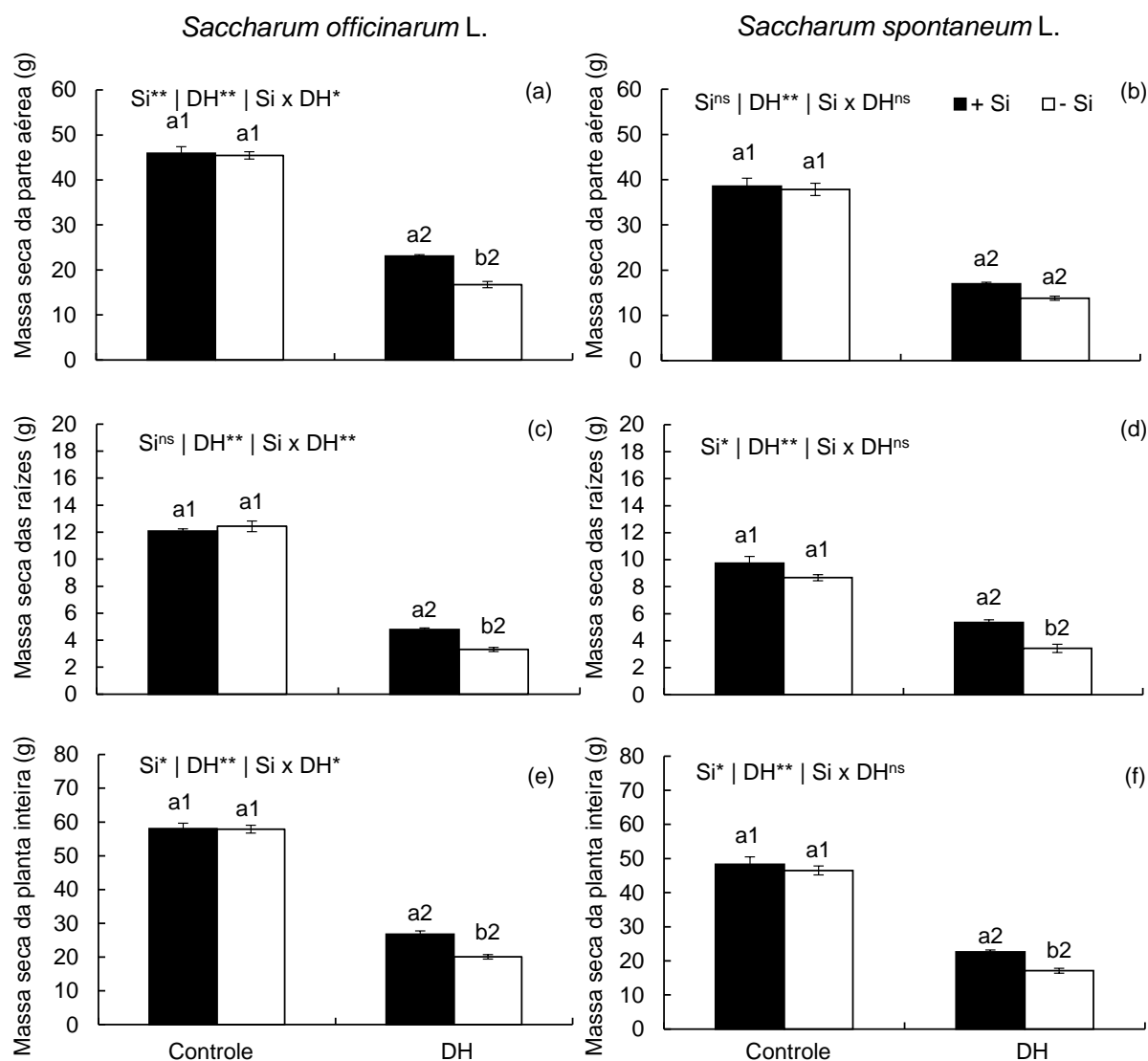


**Figura 9.** Área foliar, número de perfilhos e massa seca dos perfilhos em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c, e) e de cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d, f) com Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) e ausência de Si (-Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH). \*\* e \*: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente; <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras diferentes indicam diferenças em Si no mesmo regime de água; e números diferentes em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si pelo teste de Tukey. As barras representam o erro padrão da média;  $n = 6$ .

A massa seca dos perfilhos e a massa seca da parte aérea tiveram efeito significativo da interação entre os fatores (Si x DH) na cana-de-açúcar (ambos com  $p < 0,05$ ). Houve efeito do fator isolado DH na cana-energia (para ambas as variáveis

com  $p < 0,0001$ ), mas a interação entre os fatores (Si x DH) não foi significativa para massa seca dos perfilhos ( $p = 0,6495$ ) e da parte aérea ( $p = 0,3709$ ). A massa seca dos perfilhos (Figura 9e-f) e a massa seca da parte aérea (Figura 10a-b) diminuíram com o déficit hídrico em ambas as espécies. Na cana-de-açúcar, as plantas sob DH que receberam Si na fase de produção de mudas, em comparação com a ausência de Si, apresentaram aumento de 44% e 39% na massa seca dos perfilhos (Figura 9e) e na massa seca da parte aérea (Figura 10a), respectivamente. No entanto, isso não ocorreu na cana-energia (Figuras 9f e 10b).

Na cana-de-açúcar, a massa seca das raízes e da planta inteira teve efeito significativo da interação entre os fatores (Si x DH) ( $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente). Na cana-energia, houve efeito dos fatores isolados Si ( $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente para massa seca das raízes e da planta inteira) e DH (ambas variáveis com  $p < 0,0001$ ), sendo a interação entre os fatores (Si x DH) não significativos para massa seca de raízes ( $p = 0,2845$ ) e planta inteira ( $p = 0,2488$ ). A massa seca das raízes (Figura 10c-d) e da planta inteira (Figura 10e-f) também diminuíram com o déficit hídrico em ambas as espécies. No entanto, a presença de Si fornecida pela fertirrigação e foliar foi suficiente para aumentar a massa seca das raízes e da planta inteira em 44% e 34%, respectivamente, para a cana-de-açúcar (Figura 10c, e), e em 56% e 32%, respectivamente, para cana-energia (Figura 10d, f), cultivada sob déficit hídrico no solo.



**Figura 10.** Massa seca da parte aérea, das raízes e da planta inteira de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c, e) e de cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d, f) com Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) e ausência de Si (-Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH). \*\* e \*: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente; ns: não significativo pelo teste F. Letras diferentes indicam diferenças em Si no mesmo regime de água; e números diferentes em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si pelo teste de Tukey. As barras representam o erro padrão da média;  $n = 6$ .

#### 4 Discussão

O déficit hídrico severo por período de 7 até 60 dias após o transplante prejudicou o crescimento da cana-de-açúcar e da cana-energia, causando danos

biológicos que foram identificados por variáveis bioquímicas, e que refletiram em variáveis fisiológicas, restringindo o crescimento das plantas. Esse efeito foi evidenciado neste estudo porque o déficit hídrico é um dos principais estresses ambientais que mais afetam o estabelecimento da cana-de-açúcar, com grande prejuízo no crescimento inicial (Jain et al., 2015). Esse problema foi agravado com o uso de MPB advindas de gemas de mini-colmos, sem reserva de nutrientes e água que seriam provenientes do colmo usado no sistema convencional de plantio (Martins et al., 2015).

Os efeitos prejudiciais do déficit hídrico após o transplântio de MPB da cana-de-açúcar também foram relatados por Teixeira et al. (2020), mas por um período de duração menor de 30 dias após o transplântio e com efeitos restritos às variáveis fisiológicas e de crescimento. No entanto, os resultados do presente estudo revelaram que o período de sensibilidade das MPB da cana-de-açúcar e da cana-energia se estende por até 60 dias após o transplântio para o campo. Nessa condição, o déficit hídrico diminui o crescimento das mudas porque causa desequilíbrio no status hídrico e induz um acúmulo de ERO e estresse oxidativo. Este efeito é severo porque o aumento do estresse oxidativo é uma das razões pelas quais o déficit hídrico inibe os processos fotossintéticos das plantas (Fu e Huang, 2001; Gong et al., 2005).

O estresse oxidativo encontrado nas MPB submetidas ao regime de déficit hídrico por um período de até 60 dias após o transplântio, foi devido à diminuição do conteúdo relativo de água no tecido foliar, que possivelmente induziu o fechamento estomático e limitou a fixação de CO<sub>2</sub>, expondo os cloroplastos ao excesso de luz energia que foi usada para formar ERO (Smirnoff, 1993). Assim, as plantas sob déficit hídrico severo e na ausência de Si, apresentaram alto acúmulo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Figura 5a-b), o que causou aumento na taxa de degradação lipídica nas membranas, conforme mostrado pelo maior conteúdo de MDA (Figura 5c-d), que são marcadores adequados para a peroxidação lipídica da membrana (Kong et al., 2016) e, conseqüentemente, alto índice de extravasamento de eletrólitos (Figura 5e-f). Este cenário de estresse oxidativo na planta causou perdas na eficiência fotossintética (Figura 4a-b) e no crescimento (Figuras 8, 9 e 10a-f) em ambas as espécies.

Portanto, a absorção de Si pelas MPB na fase de formação de mudas foi aumentada para se obter os efeitos benéficos deste elemento no alívio dos danos causados pelo déficit hídrico após o transplântio. Porém, embora se soubesse que esse efeito residual do Si na muda pode ocorrer até 30 dias após o transplântio (Teixeira et al., 2020), não estava claro se o fornecimento de Si apenas na fase de formação da muda seria suficiente para proporcionar uma efeito residual do elemento por até 60 dias após o transplântio.

De acordo com os resultados desta pesquisa, o fornecimento de Si por fertirrigação e foliar proporcionou alta absorção do elemento em ambas as espécies (Figura 2a-b), demonstrando que a técnica é viável para adição de Si na fase de produção de MPB. A eficiência da fertirrigação deve-se à qualidade da solução aplicada, com baixa taxa de polimerização devido à concentração de Si em uso ( $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$ ), que manteve a forma monomérica ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) que é absorvida pela planta, pois o processo de polimerização do elemento se inicia em concentrações superiores a  $3,0 \text{ mmol L}^{-1}$  (Birchall, 1995). Além disso, a presença de um estabilizador (sorbitol) com propriedades umectantes na fonte de Si utilizada, aumentou a estabilidade das formas monoméricas de Si e diminuiu o ponto de deliquescência das gotas na superfície foliar (Babiker e Duncan, 1974), retardando assim o ressecamento dessas gotas e aumentando a absorção do elemento, principalmente pelas folhas. Esses fatores, aliados à alta frequência de aplicação (a cada 4 dias), proporcionaram a absorção constante do elemento durante a formação da muda. Além disso, poáceas como a cana-de-açúcar e a cana-energia, são consideradas acumuladoras de Si por apresentarem transportadores de alta afinidade nas membranas, apresentando mecanismos ativos (governados por transportadores de Si) e passivos (conduzidos pela transpiração) que aumentam a absorção e acúmulo de Si (Mitani et al., 2009).

Esse cenário de alta eficiência de fornecimento de Si proporcionado pela técnica de fertirrigação nas mudas foi comprovado pelo fato de que a quantidade de Si acumulada pela parte aérea da planta foi aumentada em 200% e 129%, na cana-de-açúcar e na cana-energia, respectivamente (Figura 2a-b), mesmo em plantas sob déficit hídrico por período de até 60 dias após o transplântio. Em comparação, para aplicação exclusivamente via radicular de Si, o aumento no acúmulo no tecido foliar de MPB da cana-de-açúcar foi de apenas 40% por um período menor de 30 dias após

o transplântio (Teixeira et al., 2020). Esse aumento no acúmulo de Si na planta se deve ao fato de que, na presente pesquisa, também foi utilizada a fertirrigação combinada com a pulverização das folhas, permitindo a absorção por raízes e folhas, enquanto no trabalho de Teixeira et al. (2020), a aplicação desse elemento foi restrita apenas à raiz.

Comparando o efeito entre as espécies, constatou-se que a cana-energia apresentou menor quantidade de Si acumulado nas raízes, em comparação com a cana-de-açúcar, sugerindo que a cana-energia pode ser mais eficiente no transporte de Si da raiz para a parte aérea (Figura 2a-b). Assim, é claramente importante aplicar a fertirrigação associada com a pulverização foliar às mudas de cana-de-açúcar e de cana-energia durante sua formação, o que permite alta absorção de Si com efeitos residuais mais duradouros do elemento na planta e maximiza seus efeitos benéficos.

O aumento de Si nas plantas das duas espécies cultivadas sob déficit hídrico melhorou o status hídrico nos tecidos celulares, mantendo um valor de potencial hídrico semelhante ao encontrado em plantas sem déficit hídrico (Figura 3c-d). Isso se deve ao fato de o volume de água ter permanecido constante no tecido foliar, devido a uma barreira física formada com a deposição de sílica amorfa no tecido epidérmico (Pei et al., 2010), fato comum em plantas acumuladoras de Si (Mitani et al., 2009), como cana-de-açúcar (Bezerra et al., 2019) e cana-energia.

Com o maior potencial hídrico proporcionado pelo Si, houve aumento da absorção de água pelo tecido foliar, pois a tensão da solução do xilema, que é transmitida pelas colunas contínuas de água às raízes, permaneceu mais constante (Marcos et al., 2018). Isso indica maior conteúdo de água, como encontrado em ambas as espécies (Figura 3a-b). Além disso, o aumento do conteúdo de água nas folhas, sob déficit hídrico severo, também é atribuído à proteção proporcionada pela atividade de proteínas como as aquaporinas, especializadas na absorção de água pelas plantas, e cuja expressão gênica (PIPs) é estimulada pelo Si (Chen et al., 2016). Assim, o Si preserva o conteúdo de água nas plantas cultivadas sob déficit hídrico, facilitando a absorção por manter o potencial hídrico e modular a atividade da aquaporina, e diminuindo as perdas de água, devido à barreira física de sílica acumulada na epiderme.

A manutenção de um status hídrico mais elevado causada por modificações no potencial hídrico e no conteúdo de água nas plantas, é uma estratégia importante usada pelas plantas para sobreviver ao estresse hídrico e preservar a integridade de suas proteínas, enzimas e membranas celulares (Kim et al., 2017). Assim, o balanço do status da água encontrado nas mudas que receberam Si na fase de formação, resultou em menos danos à atividade fotossintética quando as mudas foram submetidas ao déficit hídrico, em comparação com aquelas que não receberam o elemento (Figura 4a-b). O aumento da relação  $F_v/F_m$  induzido pelo Si indica que a maior parte da radiação solar estava sendo utilizada na fase fotoquímica da fotossíntese, sem prejuízo dos centros de reação do PSII devido ao regime de água do solo em uso (Silva et al., 2012). Em adição, a alta eficiência no uso da radiação solar fornecida pelo Si também é atribuída ao efeito desse elemento na diminuição da degradação da membrana celular causada pelo menor acúmulo de ERO (Smirnoff, 1993). Resultados semelhantes foram encontrados em cana-de-açúcar (Bezerra et al., 2019) e plantas forrageiras (Rocha et al., 2021).

Um efeito do acúmulo de ERO em células vegetais sob estresse é a peroxidação lipídica por meio da oxidação de ácidos graxos insaturados, levando a danos na membrana e extravasamento de eletrólitos. Na presente pesquisa, o índice de extravasamento de eletrólitos celulares (Figura 5e-f) e o conteúdo de MDA (Figura 5c-d) aumentaram em plantas cultivadas sob o regime de déficit hídrico, mas diminuíram com a aplicação de Si. Esses resultados são consistentes com os encontrados em plantas de cana-de-açúcar (Teixeira et al., 2021), milho (Ibrahim et al., 2020) e trigo (Gong et al., 2005).

Sob condições de seca, espécies reativas de oxigênio se acumulam e um sistema de defesa composto de antioxidantes enzimáticos e não-enzimáticos é ativado para diminuir a oxidação dos pigmentos fotossintéticos e a peroxidação lipídica (Gong et al., 2005; Kim et al., 2017). Nesta pesquisa, o efeito residual benéfico do Si aplicado na fase de formação da MPB, diminuiu o acúmulo de ERO quando as mudas foram submetidas ao déficit hídrico, por meio da ativação dos mecanismos de proteção antioxidantes enzimáticos, conforme demonstrado pela maior atividade da SOD (Figura 6a-b), CAT (Figura 6c-d) e APX (Figura 6e-f), e antioxidantes não-

enzimáticos com um aumento no conteúdo de prolina (Figura 7a-b), que atuam juntos para dissipar esses compostos.

A atividade da SOD em plantas com déficit hídrico na presença de Si foi semelhante ao valor encontrado na condição controle. A SOD é a primeira enzima envolvida na rota de desintoxicação de ERO, desempenhando um papel fundamental na inativação do oxigênio ativo, catalisando  $O_2^-$  a  $H_2O_2$  e  $O_2$  (Gratão et al., 2005). Porém, apesar da formação de  $H_2O_2$ , não houve acúmulo dessa ERO, pois também houve aumento na atividade das enzimas CAT e APX que a utilizam como substrato. O aumento da atividade da CAT, particularmente, demonstra que a exposição dos cloroplastos ao excesso de energia de excitação, ativou o mecanismo de dissipação de energia por fotorrespiração (Smirnoff, 1993). Isso exigiu a ativação da enzima presente nos peroxissomos para realizar a desintoxicação causada pelo  $H_2O_2$  que é produzido na oxigenação da Rubisco (Gratão et al., 2005). No entanto, os cloroplastos também podem ter sido fortemente afetados, pois as plantas com déficit hídrico apresentaram maior atividade de APX, em comparação com aquelas em condição de umidade adequada (Figura 6e-f).

Além da ativação do sistema antioxidante enzimático, o Si também causou aumento na concentração de prolina, que é um aminoácido considerado um soluto orgânico compatível de baixo peso molecular e alta solubilidade (Pei et al., 2010) que mantém o ajuste osmótico celular e o status hídrico dos tecidos (Ibrahim et al., 2020). A prolina também pode atuar como uma chaperona molecular, protegendo a integridade das proteínas e mantendo ou aumentando a atividade enzimática. Dessa forma, contribui como um sinal na dissipação de ERO (Szabados e Saviouré, 2010). Assim, o aumento do conteúdo de prolina melhorou o sistema de defesa das plantas fertilizadas com Si em ambas as espécies (Figura 7a-b).

Notavelmente, o Si induziu um aumento na tolerância à seca ao manter a homeostase na formação de ERO, diminuindo o escape de elétrons no sistema fotossintético ao manter o status hídrico, o que evitou a degradação de enzimas do sistema de defesa antioxidante. Além disso, o Si atua na regulação do sistema de enzimas antioxidantes em plantas com déficit hídrico (Kim et al., 2017; Ibrahim et al., 2020). Portanto, os efeitos protetores no sistema de defesa antioxidante mediados

pelo Si na cana-de-açúcar são atribuídos principalmente à contribuição advinda da ação das enzimas CAT e APX; e na cana-energia, ao aumento da atividade de APX e prolina. Porém, em ambas as espécies, os mecanismos de proteção aprimorados pelo Si proporcionaram diminuição no conteúdo de  $H_2O_2$  (Figura 5a-b), com efeito benéfico na manutenção da integridade da membrana celular, conforme indicado pelo menor conteúdo de MDA (Figura 5c-d) e no índice de extravasamento de eletrólitos celulares (Figura 5e-f).

Os processos de desenvolvimento da folhagem são afetados pela seca, levando a uma menor taxa de divisão e expansão celular em plantas com estresse hídrico em comparação com plantas sem estresse (Dosio et al., 2011). Este efeito do déficit hídrico em limitar o crescimento ocorreu nas duas espécies na presente pesquisa porque diminuiu as variáveis de crescimento (Figuras 8 e 9), número de perfilhos (Figura 8c-d), área foliar (Figura 9a-b) e, conseqüentemente, a produção de massa seca (Figuras 9 e 10). Porém, a atenuação dos danos causados pelo déficit hídrico severo nas plantas, promovido pelo efeito benéfico do Si por meio dos mecanismos biológicos discutidos acima, como aumento do conteúdo de água e do sistema de defesa de defesa enzimático e não-enzimático, favoreceu as variáveis de crescimento estudadas (Figuras 8 e 9) e resultou na maior produção de massa seca de perfilhos (Figura 9e-f), colmos (Figuras 10a-b), raízes (Figuras 10c-d) e da planta inteira (Figuras 10e -f). Esses resultados são consistentes com os encontrados em MPB de cana-de-açúcar (Teixeira et al., 2020) e plantas de cana-de-açúcar (Bezerra et al., 2019).

Vale ressaltar que os efeitos benéficos do Si encontrados para a área foliar (Figura 9a-b), massa seca dos perfilhos (Figura 9e-f) e parte aérea (Figura 10a-b) de MPB da cana-de-açúcar sob déficit hídrico foram mais expressivos, em comparação aos obtidos na cana-energia. Isso sugere que a contribuição do Si no aumento da atividade das enzimas CAT e APX, observadas principalmente na cana-de-açúcar, é mais eficiente na manutenção das variáveis de crescimento, em comparação à ação das enzimas APX e prolina na cana-energia.

Assim, a segunda hipótese desta pesquisa foi aceita, indicando que o efeito benéfico do Si na atenuação dos danos causados pelo déficit hídrico se deve à

melhoria fisiológica e que está associado aos benefícios bioquímicos obtidos pelo aumento da atividade de antioxidantes enzimáticos e não-enzimáticos, que ocasionaram uma diminuição do estresse oxidativo e, conseqüentemente, aumento do crescimento das plantas. O achado desta pesquisa sugere que o fornecimento de Si por meio da fertirrigação e foliar na fase de produção de mudas obtidas pelo sistema MPB pode mitigar os efeitos do déficit hídrico com duração de até 60 dias após o transplântio para o campo de *S. officinarum* L. e *S. spontaneum* L. As implicações práticas desta pesquisa são importantes, pois podem aumentar a viabilidade e sustentabilidade do uso de MPB, principalmente porque essas espécies são plantadas em regiões tropicais quase o ano todo e, portanto, em alguns meses de baixa pluviosidade, além do fato de que o Si não é usado na fertilização mineral no plantio da cultura.

## 5 Conclusão

O fornecimento de Si via fertirrigação e foliar na formação de MPB promove acúmulo suficiente para mitigar os efeitos causados pelo déficit hídrico com duração de até 60 dias após o transplântio, por meio da modulação do sistema de resposta antioxidante, favorecendo o metabolismo fisiológico da cana-de-açúcar e da cana-energia. Esta pesquisa demonstrou que a estratégia baseada no fornecimento de Si viabiliza o uso de MPB nos cultivos, aumentando a viabilidade e sustentabilidade desse sistema de produção.

## 6 Referências

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

Azevedo RA, Alas RM, Smith RJ, Lea PJ (1998) Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley. **Physiologia Plantarum** 104:280–292. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1998.1040217.x>

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

Barrs H, Weatherley P (1962) A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. **Australian Journal of Biological Sciences** 15:413–428. <https://doi.org/10.1071/BI9620413>

Basnayake J, Jackson PA, Inman-Bamber NG, Lakshmanan P (2012) Sugarcane for water-limited environments. Genetic variation in cane yield and sugar content in response to water stress. **Journal of Experimental Botany** 63:6023–6033. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers251>

Bates LS, Waldren RP, Teare ID (1973) Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil** 39:205–207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>

Bezerra BKL, Lima GPP, dos Reis AR, Silva MA, Camargo, MS (2019) Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum** 41:189. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>

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

Boaretto LF, Carvalho G, Borgo L, Creste S, Landell MGA, Mazzafera P, Azevedo RA (2014) Plant physiology and biochemistry water stress reveals differential antioxidant responses of tolerant and non-tolerant sugarcane genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry** 74:165–175. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.11.016>

Bradford MM (1976) A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry** 72:248–254

Camargo MS, Bezerra BKL, Holanda LA, Oliveira AL, Vitti AC, Silva MA (2019) Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 19:81–91. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>

Cavalcante VS, Prado RM, Vasconcelos RL, Campos CNS (2016) Iron concentrations in sugar cane (*Saccharum officinarum* L.) cultivated in nutrient solution. **Agrociencia** 50:867–875

Chen D, Cao B, Wang S, Liu P, Deng X, Yin L, Zhang Suiqi (2016) Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific Reports** 6:1–14. <https://doi.org/10.1038/srep22882>

Dionisio-Sese ML, Tobita S (1998) Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science** 135:1–9. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00025-9)

Dosio GAA, Tardieu F, Turc O (2011) Floret initiation, tissue expansion and carbon availability at the meristem of the sunflower capitulum as affected by water or light deficits. **New Phytologist** 189:94–105. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03445.x>

Embrapa (1997) **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 212p.

Epstein E (1999) Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology** 50:641–664

Fu J, Huang B (2001) Involvement of antioxidants and lipid peroxidation in the adaptation of two cool-season grasses to localized drought stress. **Environmental and Experimental Botany** 45:105–114. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(00\)00084-8](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(00)00084-8)

Giannopolitis CN, Ries SK (1977) Superoxide dismutases. I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology** 59:309–314. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>

Gomes-Junior RA, Gratão PL, Gaziola SA, Mazzafera P, Lea PJ, Azevedo RA (2007) Selenium-induced oxidative stress in coffee cell suspension cultures. **Functional Plant Biology** 34:449–456. <https://doi.org/10.1071/FP07010>

Gong H, Zhu X, Chen K, Wang S, Zhang C (2005) Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science** 169:313–321. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.02.023>

Gratão PL, Monteiro CC, Carvalho RF, Tezotto T, Piotto FA, Peres LEP, Azevedo RA (2012) Biochemical dissection of diageotropica and never ripe tomato mutants to Cd-stressful conditions. **Plant Physiology and Biochemistry** 56:79–96. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.009>

Gratão PL, Polle A, Lea PJ, Azevedo RA (2005) Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology** 32:481–494. <https://doi.org/10.1071/FP05016>

Heath RL, Packer L (1968) Photoperoxidation in isolated chloroplasts I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics** 125:189–198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)

Hoagland DR, Arnon DI (1950) **The water-culture method for growing plants without soil**. Berkeley: Circular 247, 32p.

Ibrahim MFM, El-Samad GA, Ashour H, El-Sawy AM, Hikal M, Elkelish A, El-Gawad HÁ, El-Yazied AA, Hozzein WN, Farag R (2020) Regulation of agronomic traits, nutrient uptake, osmolytes and antioxidants of maize as influenced by exogenous potassium silicate under deficit irrigation and semiarid conditions. **Agronomy** 10:1-19. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081212>

Jain R, Chandra A, Venugopalan V, Solomon S (2015) Physiological changes and expression of SOD and P5CS genes in response to water deficit in sugarcane. **Sugar Tech** 17:276–282. <https://doi.org/10.1007/s12355-014-0317-2>

Kim Y, Khan AL, Waqas M, Lee I (2017) Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: A review. **Frontiers in Plant Science** 8:1–7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00510>

Kong W, Liu F, Zhang C, Zhang J, Feng H (2016) Non-destructive determination of Malondialdehyde (MDA) distribution in oilseed rape leaves by laboratory scale NIR hyperspectral imaging. **Scientific Reports** 6:1–8. <https://doi.org/10.1038/srep35393>

Korndörfer GH, Pereira HS, Nolla A (Eds) (2004) **Análise de silício no solo, planta e fertilizantes**. Uberlândia: UFU, 50p.

Kraska JE, Breitenbeck GA (2010) Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 41:2075–2085. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>

Kraus TE, McKersie BD, Fletcher RA (1995) Paclobutrazol-induced tolerance of wheat leaves to paraquat may involve increased antioxidant enzyme activity. **Journal of Plant Physiology** 145:570–576. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81790-6](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81790-6)

Landell MGA, Campana MP, Figueiredo P, Xavier MA, Anjos I A, Dinardo-Miranda LL, Scarpari MS, Garcia JC, Bidóia MAP, Silva DN, Mendonça JR, Kanthack RAD, Campos MF, Brancalião SR, Petri RH, Miguel PEM (2012). **Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 22p (Documentos, 109).

Lichtenthaler HK, Buschmann C, Knapp M (2005) How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio R<sub>Fd</sub> of leaves with the PAM fluorometer. **Photosynthetica** 43:379–393. <https://doi.org/10.1007/s11099-005-0062-6>

Marcos FCC, Silveira NM, Mokochinski JB, Sawaya ACHF, Marchiori PER, Machado EC, Souza GM, Landell MGA, Ribeiro RV (2018) Drought tolerance of sugarcane is improved by previous exposure to water deficit. **Journal of Plant Physiology** 223:9–18. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.02.001>

Martins APC, Albrecht LP, Castaldo J, Carneiro AR, Zucareli V (2015) Novas tecnologias no plantio de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). **Journal of Agronomic Sciences** 4:301–317

Matsuoka S (2017) Free fiber level drives resilience and hybrid vigor in energy cane. **Journal of Scientific Achievements** 2:1–35

Matsuoka S, Kennedy AJ, Santos EGD, Tomazela A L, Rubio LCS (2014) Energy cane: Its concept, development, characteristics, and prospects. **Advances in Botany** 2014:1–13. <https://doi.org/10.1155/2014/597275>

Mitani N, Yamaji N, Ma JF (2009) Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology** 50:5–12. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcn110>

Moldes CA, Medici LO, Abrahão OS, Tsai SM, Azevedo RA (2008) Biochemical responses of glyphosate resistant and susceptible soybean plants exposed to glyphosate. **Acta Physiologiae Plantarum** 30:469–479. <https://doi.org/10.1007/s11738-008-0144-8>

Pei ZF, Ming DF, Liu D, Wan GL, Geng XX, Gong HJ, Zhou WJ (2010) Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. **Journal of Plant Growth Regulation** 29:106–115. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9120-9>

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

Rocha JR, Prado R de M, Teixeira GCM, Oliveira Filho ASB de (2021) Si fertigation attenuates water stress in forages by modifying carbon stoichiometry, favouring physiological aspects. **Journal of Agronomy and Crop Science** 1:1–13. <https://doi.org/10.1111/jac.12479>

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumberras JF, Coelho MR, Almeida JÁ, Araújo Filho JC, Oliveira JB, Cunha TJ (2018) **Brazilian soil classification system**, 2a. Brasília: Embrapa Soils.

Santos LS, Braga NCC, Rodrigues TM, Neto AR, Brito MF, Severiano, E da C (2020) Pre-sprouted seedlings of sugarcane using sugarcane industry by-products as substrate. **Sugar Tech** 1:1–11. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00798-y>

Silva PP da, et al (2012) Path analysis for selection of drought tolerant sugarcane genotypes through physiological components. **Industrial Crops and Products** 37:11–19. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.11.015>

Smirnoff N (1993) The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation. **New Phytologist** 125:27–58. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1993.tb03863.x>

Szabados L, Saviouré A (2010) Proline: a multifunctional amino acid. **Trends in Plant Science** 15:89–97. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.11.009>

Teixeira GCM, Prado R de M, Rocha AMS, Santos LCN dos, Sarah MM dos S, Gratão PL, Fernandes C (2020) Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the

effects of water deficit after transplanting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 20:849–859. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00170-4>

Teixeira GCM, Prado R de M, Rocha AMS (2021) Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water deficit damage in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science** 00:1–10. <https://doi.org/10.1111/jac.12511>

Turner NC (1981) Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. **Plant and Soil** 58:339–366. <https://doi.org/10.1007/BF02180062>

### **CAPÍTULO 3 - Nutrição silicatada e seus mecanismos biológicos envolvidos para a eficiência do uso da água em cultivos da cana-de-açúcar e da cana-energia sob déficit hídrico**

**RESUMO** - A cana-de-açúcar e recentemente a cana-energia fortalecem a capacidade de produção de bioenergia renovável para o mundo, mas com as mudanças climáticas tem aumentado a ocorrência de seca limitando o seu crescimento. Uma das estratégias para atenuar danos do déficit hídrico nestas espécies seria a partir da contribuição da nutrição silicatada na fisiologia a fim de aumentar a eficiência do uso da água favorecendo a sustentabilidade destes cultivos, entretanto os estudos ainda são incipientes. Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar se o Si aplicado via fertirrigação e foliar na fase de produção de mudas com complementação após o transplântio para o campo é eficiente na atenuação dos efeitos causados pelo déficit hídrico na cana-de-açúcar e na cana-energia, bem como, elucidar quais os mecanismos fisiológicos e bioquímicos envolvidos. Dois experimentos foram desenvolvidos, um com cana-de-açúcar e outro com cana-energia. Os tratamentos consistiram em esquema fatorial 2 x 2, com ausência (-Si) e presença de Si (+Si) aplicado via fertirrigação e foliar; combinado com dois regimes de água: 70% (regime hídrico adequado) e 30% (déficit hídrico severo) da capacidade de retenção de água no solo, dispostos em blocos casualizados com 5 repetições. O fornecimento do Si ocorreu durante a fase de formação da muda pré-brotada com complementação após o transplântio para o vaso preenchido com amostras de Neossolo Quartzarênico e nesta fase houve indução dos regimes de água com duração de 7 até 160 dias após o transplântio. O déficit hídrico severo diminuiu o conteúdo de água e o potencial hídrico das plantas, induzindo o estresse oxidativo e prejudicando as trocas gasosas, a eficiência fotossintética e do uso da água, com conseqüente diminuição do crescimento das plantas. O fornecimento de Si via fertirrigação associada a foliar na fase de formação de mudas com complementação após o transplântio foi eficiente em aumentar o acúmulo do elemento nas plantas de ambas as espécies. O Si na planta foi eficaz na atenuação dos danos causados pelo déficit hídrico severo até a fase de formação inicial dos colmos, a partir de mecanismos que mantêm o equilíbrio hídrico e fisiológico por favorecer o sistema de defesa antioxidante em plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia.

**Palavras-chave:** estresse abiótico, irrigação deficitária, nutrição de plantas, *Saccharum officinarum* L., *Saccharum spontaneum* L.

## **Silicate nutrition and its biological mechanisms involved in the water efficiency use in sugarcane and energy cane crops under water deficit**

**ABSTRACT** - Sugarcane and recently energy cane strengthens the world's renewable bioenergy production capacity, but with climate change, the occurrence of drought has limited its growth. One of the strategies to attenuate the damage caused by the water deficit in these species would be from the contribution of silicate nutrition in physiology in order to increase the water efficiency use, favoring the sustainability of these crops, however, studies are still incipient. This work was carried out with the objective of evaluating whether Si applied via fertigation and foliar spraying in the seedling production phase with complementation after transplanting to the field is efficient in attenuating the effects caused by water deficit in sugarcane and energy cane, as well as elucidate the physiological and biochemical mechanisms involved. Two experiments were carried out, one with sugarcane and the other with energy cane. The treatments consisted of a 2 x 2 factorial scheme, with absence (-Si) and presence of Si (+Si) applied via fertigation and foliar spraying; combined with two water regimes: 70% (adequate water regime) and 30% (severe water deficit) of the soil water retention capacity, arranged in randomized blocks with 5 replications. The Si supply occurred during the formation phase of the pre-sprouted seedling and during the transplanting phase to the pot filled with samples of Entisols (Quartzipsamments), and in this phase there was induction of water regimes from 7 to 160 days after transplantation. The severe water deficit reduced the water content and water potential of plants, inducing oxidative stress and impairing gas exchange, photosynthetic water efficiency use, with a consequent reduction in plant growth. The Si supply via fertigation associated with foliar spraying in the seedling formation phase with complementation after transplanting was efficient in increasing the accumulation of the element in the plants. The Si in the plant was effective in attenuating the damage caused by severe water deficit until the initial culms formation phase, through mechanisms that maintain the water and physiological balance by favoring the antioxidant defense system in sugarcane and energy cane plants.

**Keywords:** abiotic stress, water use efficiency, plant nutrition, *Saccharum officinarum* L., *Saccharum spontaneum* L.

## 1 Introdução

A seca é um dos principais fatores que mais limitam a produção agrícola (Schaller et al., 2020) e tem se agravado havendo estimativa que aumente no futuro devido as mudanças climáticas (Besharat et al., 2020) causando perdas na produtividade da cana-de-açúcar. Esse efeito é importante pois a área de cultivo de cana-de-açúcar tem se expandido e atualmente ocupa mais de 100 países (FAO, 2021) por ser fonte de bioenergia sustentável contribuindo para diminuição na emissão de gases com efeito de estufa (Lisboa et al., 2011). Neste cenário, têm havido a ampliação do cultivo irrigado da cana-de-açúcar, com destaque nos países de maior produção mundial, como o Brasil (ANA, 2021), a China (He et al., 2021) e a Índia (Dingre et al., 2021). Desse modo, diminuir o consumo e aumentar o uso econômico da água para garantir recursos adequados e uma produção agrícola sustentável é de grande importância (Firouzabadi et al., 2021).

Uma estratégia para diminuir os danos induzidos pelo déficit hídrico nos cultivos seria com uso do silício (Si) sendo o elemento mais abundante no solo depois do oxigênio, pois o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) compreende 50-70% da massa do solo (Epstein, 1994), mas na solução o Si disponível está na forma de ácido monosilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) em concentração baixa ( $\sim 1 \text{ mmol L}^{-1}$ ) (Katz et al., 2021). O Si é um elemento benéfico absorvido na forma de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  que se mantém na mesma forma na seiva do xilema e atinge as folhas pelo gradiente de transpiração (Mitani-Ueno e Ma, 2021). Se concentra no tecido foliar na forma polimerizada como sílica amorfa e biogênica constituindo 90% do Si absorvido, estando contido em estruturas de Si-celulose presente na parede celular (Yoshida, 1965).

Os efeitos benéficos do Si em plantas sob déficit hídrico previnem o desequilíbrio do status hídrico foliar, pois os depósitos deste elemento nas paredes celulares diminuem às perdas de água por transpiração (Pei et al., 2010). O Si também induz função osmorreguladora modificando os teores de prolina que proporciona ajuste na condutividade hidráulica das raízes (Avila et al., 2021) e estimula a atividade de enzimas como a aquaporina (Abbas et al., 2015), aumentando a absorção de água.

É possível ainda que o papel do Si na regulação dos sistemas de defesa antioxidante enzimáticos (Bezerra et al., 2019) e não-enzimáticos (Teixeira et al., 2021) favoreça a tolerância da planta aos danos da seca. Assim, ao diminuir o estresse oxidativo o Si preserva e aumenta os pigmentos fotossintetizantes (Camargo et al., 2019) e mantém a alta eficiência fotoquímica (Verma et al., 2021). Isso deve aumentar a duração das folhas verdes ativas e conseqüentemente, a taxa fotossintética e o crescimento das plantas, entretanto torna-se necessário sua comprovação.

Para ter o benefício biológico do Si na planta é importante alta absorção do elemento que pode ocorrer com uso do silicato de cálcio que necessita ser incorporado no solo para favorecer sua dissolução, mas as doses são altas (1000 kg ha<sup>-1</sup> de Si) (Camargo et al., 2021). Uma outra forma seria a partir do uso de fontes de alta solubilidade (silicato de potássio ou silicato de sódio). Fontes solúveis permitem uso via fertirrigação que poderia diminuir taxas de polimerização do Si no solo e utilizar doses baixas deste elemento por área, mas que possa garantir adequada absorção do elemento pela planta. Isso pode ocorrer porque a fertirrigação permite o uso de solução com concentrações abaixo de 3 mmol L<sup>-1</sup> de Si evitando a ocorrência de polimerização (Birchall, 1995). A eficiência da fertirrigação com Si em otimizar a absorção deste elemento já foi verificado em plantas forrageiras (Rocha et al., 2021) e em cana-de-açúcar, mas apenas na fase de produção de mudas pré-brotadas (Teixeira et al., 2021). Contudo, faltam estudos em cana-planta especialmente em fases com elevadas taxas de crescimento relativo que pode ocorrer entre 84 e 135 dias após o transplante (Dingre et al., 2021) dependendo do genótipo e do ambiente de cultivo (Ramesh, 2000).

Os trabalhos com Si concentram em cana-de-açúcar e são restritos apenas a parâmetros fisiológicos, sem demonstrar se ocorre efeitos aditivos de mecanismos bioquímicos e até onde sabemos não há relatos em cana-planta de cana-energia. Contudo, sabe-se que o déficit hídrico induz estresse oxidativo aumentando a produção de espécies reativas de oxigênio (Ferreira et al., 2017). Além disso, existem indicativos do aumento do plantio da cana-de-açúcar e da cana-energia em áreas com maior ocorrência de deficiência hídrica, levando à maior necessidade de irrigação suplementar (ANA, 2021). Isso fortalece a importância do emprego do Si colaborando

com o uso racional da água (doce) para irrigação, que é um recurso finito (Cardozo et al., 2018).

Assim, é evidente que os efeitos da aplicação de Si por fertirrigação associado a foliar durante a produção de mudas pré-brotadas com complementação após seu transplântio no solo ainda não foram descritos, bem como, os seus reflexos na fase de formação inicial dos colmos da cana-planta de cana-de-açúcar e de cana-energia. Contudo, é importante avaliar duas estratégias envolvendo uso otimizado do Si nos cultivos, uma seria o uso deste elemento na forma solúvel via fertirrigação e foliar. A outra seria o emprego do Si desde a formação das mudas pré-brotadas e após transplântio para o solo. Essas estratégias poderiam maximizar os benefícios biológicos deste elemento na planta para mitigar déficit hídrico severo em cana-de-açúcar e em cana-energia que normalmente ocorre no campo, mas há necessidade de comprovação.

Diante disso, é importante verificar as seguintes hipóteses: i) a fertirrigação associada a pulverização foliar com Si na fase de formação de mudas com a complementação após o transplântio ( $<20 \text{ kg ha}^{-1}$  de Si) proporciona elevado acúmulo deste elemento nas plantas; ii) o Si promove benefício pela indução de mecanismos de defesa antioxidante enzimático (CAT, SOD e APX) e não-enzimático (fenóis e prolina) diminuindo estresse oxidativo e isso favorece os aspectos fisiológicos incluindo aumento do conteúdo e da eficiência do uso da água, pigmentos, fotossíntese e conseqüentemente perfilhamento, número de folhas verdes e a produção de massa seca das duas espécies avaliadas; iii) o Si é eficiente para atenuar danos causados pelo déficit hídrico severo até a fase de formação inicial dos colmos da cana-de-açúcar e da cana-energia.

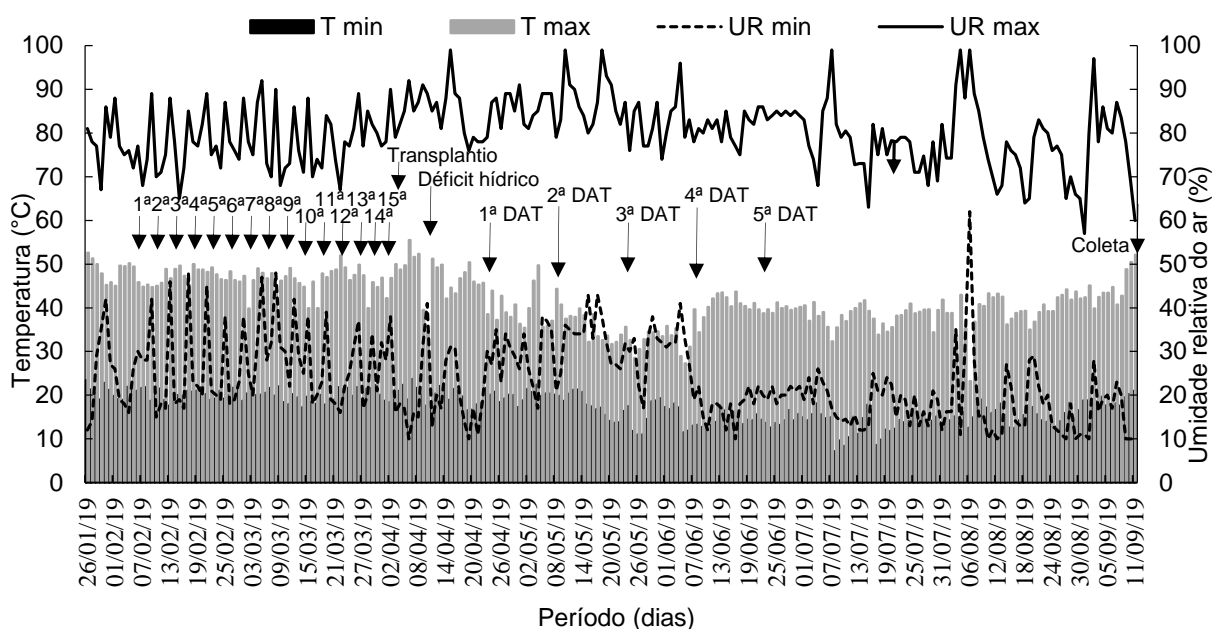
Para testar essas hipóteses foram realizados dois experimentos, sendo um com cana-de-açúcar e outro com cana-energia objetivando-se avaliar se o Si aplicado via fertirrigação associado com a pulverização foliar na fase de produção de mudas com complementação após o transplântio para o solo é eficiente na atenuação dos efeitos causados pelo déficit hídrico na cana-de-açúcar e na cana-energia, bem como, elucidar os mecanismos fisiológicos e bioquímicos envolvidos.

Sendo aceita a hipótese desta pesquisa permitirá compreender os mecanismos sinérgicos entre o Si e aspectos fisiológicos e bioquímicos da cana-de-açúcar e da cana-energia. Isso permitiria usar benefícios da nutrição mineral de plantas (Si) em favor do uso mais eficiente da água com ganhos ambientais e agronômicos ao favorecer o estabelecimento mais sustentável destas espécies mesmo em regiões sujeitas a secas.

## 2 Material e métodos

### 2.1 Material vegetal e condições de crescimento

Foram desenvolvidos dois experimentos simultaneamente em casa de vegetação da UNESP Câmpus de Jaboticabal, no período de janeiro a setembro de 2019. Os dados de temperatura e de umidade relativa do ar no interior da casa de vegetação foram registrados diariamente com auxílio do aparelho termohigrômetro (U23-001, Sigma Sensors, Brasil) (Figura 1).



**Figura 1.** Temperatura máxima (T max) e mínima (T min) e umidade relativa máxima (UR max) e mínima (UR min) do ar na casa de vegetação durante o período do experimento. As setas (1ª a 15ª) indicam as datas de aplicação de silício. DAT= dias após o transplante.

Utilizou-se mudas pré-brotadas de duas espécies: *S. officinarum* L. (cana-de-açúcar - variedade RB 966928 – experimento I) e *S. spontaneum* L. (cana-energia - variedade VX2 – experimento II). A variedade de cana-energia utilizada foi obtida da Vignis®, sendo classificada como tipo II pela produção de alto teor de fibra (>28%) e baixo teor de açúcar na forma de sacarose (<6%) (Matsuoka et al., 2014).

Os experimentos foram desenvolvidos em duas etapas iniciando na fase de formação das mudas cultivadas em vasos preenchidos com substrato inerte que receberam os tratamentos com Si dos 10 dias até os 70 dias após emergência do broto e outras mudas que não receberam Si. Em seguida iniciou a outra fase a partir do transplântio destas mudas para vasos preenchidos com amostras de um Neossolo Quartzarênico que receberam os tratamentos com Si até 80 dias após o transplântio e os regimes hídricos que foram aplicados dos 7 até 160 dias após o transplântio com a finalização dos experimentos.

## **2.2 Tratamentos e delineamento experimental**

Em ambos os experimentos com cana-de-açúcar e cana-energia, os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial 2 x 2, sendo constituído pelo fornecimento de Si: ausência (-Si) e presença de Si (+Si) aplicado via fertirrigação e foliar durante fase de formação de mudas e também após o transplântio combinados com dois regimes hídricos no solo: 70% (regime hídrico adequado - controle) e 30% (déficit hídrico severo - DH) da capacidade de retenção de água no solo (CRA), aplicados apenas na fase após o transplântio das culturas. As parcelas foram dispostas em blocos casualizados, com 5 repetições.

As mudas pré-brotadas foram produzidas na primeira fase do experimento. Para tal, foi realizado o plantio dos mini-colmos ( $5 \pm 0,5$  cm) em bandejas de produção de mudas preenchida com vermiculita fina. A solução nutritiva utilizada foi a de Hoagland e Arnon (1950) com alteração na concentração de ferro para  $368 \mu\text{mol L}^{-1}$  na forma de Fe-EDDHA, conforme indicação de Cavalcante et al. (2016). Para evitar a salinização do substrato, a concentração da solução nutritiva durante a primeira semana de cultivo foi mantida a 25% de diluição e elevada para 50% da segunda semana até o fim da fase de formação das mudas. Para determinar o volume de solução a ser aplicado, foi previamente realizado um teste de saturação, sendo o

volume de 10 mL por célula suficiente para saturação do substrato evitando perda por lixiviação. O valor pH da solução foi ajustado para  $5,5 \pm 0,2$  com o uso de solução de ácido clorídrico ou hidróxido de sódio ambos a  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ .

A fonte de Si solúvel utilizada foi o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol ( $113,4 \text{ g L}^{-1}$  de Si,  $18,9 \text{ g L}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $100 \text{ mL L}^{-1}$  de sorbitol e pH 11,8) na concentração de  $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$ . Essa concentração de Si foi usada porque o elemento em solução inicia processo de polimerização a partir da concentração de  $3 \text{ mmol L}^{-1}$  (Birchall, 1995). Foram realizadas 15 fertirrigações de Si com intervalos de 4 dias, a partir de 10 dias após a emergência plena dos brotos (DAE) (Figura 1), aplicando 10 mL por muda via substrato (para induzir absorção radicular) e 1,47 mL por muda via pulverização foliar (para induzir absorção foliar). A quantidade de solução aplicada via foliar foi definido pela média do volume gasto em pulverizações em um número conhecido de mudas, objetivando o molhamento da superfície foliar com microgotas, mas sem induzir escorrimento. Em todas as pulverizações foliares de Si, a umidade relativa do ar foi superior a 60% e a temperatura, inferior a  $30^\circ\text{C}$ .

O valor pH da solução fertirrigada foi ajustado para  $5,5 \pm 0,2$ . Foi realizado o equilíbrio da quantidade de potássio presente na fonte de Si ( $15,7 \text{ g L}^{-1}$  de K) nos tratamentos com ausência do elemento, utilizando uma solução de cloreto de potássio a  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  com aplicação via radicular e por pulverização foliar. Em cada condição de fornecimento de Si (+Si e -Si) foram utilizadas 50 mudas de cada espécie de cana, selecionando as de comprimento e diâmetro mais uniformes para posterior transplântio.

Após a fertilização com Si, aos 70 DAE, iniciou-se a segunda fase do experimento. Nessa ocasião, vasos de  $20 \text{ dm}^3$  (área superficial =  $962 \text{ cm}^2$ ) foram preenchidos com amostras de Neossolo Quartzarênico (Santos et al., 2018) coletado do horizonte Ap. Foi realizada uma análise química do solo para fins de fertilidade, de acordo com o método descrito por Raij et al. (2001), apresentando os seguintes resultados: pH ( $\text{CaCl}_2$ ): 4,3, matéria orgânica:  $9,0 \text{ g dm}^{-3}$ , P (res):  $2,0 \text{ mg dm}^{-3}$ , B:  $<0,12 \text{ mg dm}^{-3}$ , Cu:  $0,2 \text{ mg dm}^{-3}$ , Fe:  $9,0 \text{ mg dm}^{-3}$ , Mn:  $1,7 \text{ mg dm}^{-3}$ , Zn:  $0,4 \text{ g dm}^{-3}$ , Ca:  $3,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , Mg:  $1,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , K:  $0,3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , H+Al:  $16,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , soma de bases (SB):  $4,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , capacidade de troca de cátions (CTC):  $20,3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$

e saturação por bases (V: SBx100/CTC): 21,0%. O teor de Si foi de  $1,0 \text{ mg dm}^{-3}$ , determinado usando cloreto de cálcio a  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  como extrator conforme o método descrito por Korndörfer et al. (2004).

Aos trinta dias antes do transplântio das mudas, realizou-se aplicação de calcário (poder relativo de neutralização total: 125%, CaO: 48%, MgO: 16%) para elevar o V a 60%, sendo adequadamente misturado a amostra de solo e mantido em 70% da CRA para induzir a reação do calcário. Após esse período, foi realizado a aplicação de fertilizante no solo utilizando  $250 \text{ mg dm}^{-3}$  de N e K e  $150 \text{ mg dm}^{-3}$  de P nas fontes sulfato de amônio, cloreto de potássio e superfosfato triplo, respectivamente. O superfosfato triplo foi aplicado em dose única sendo incorporado ao volume de solo. A aplicação de N e K foi realizada via fertirrigação em cinco doses de  $50 \text{ mg dm}^{-3}$  iniciando quatro dias após o transplântio com intervalos de 7 dias. Também foi realizada aplicação de  $5 \text{ mg dm}^{-3}$  de Zn na forma de sulfato de zinco e  $2 \text{ mg dm}^{-3}$  de B como ácido bórico via fertirrigação aplicados em dose única na primeira aplicação dos fertilizantes N e K.

No transplântio, as mudas tinham seis folhas completamente desenvolvidas e foi realizado o corte a 30 cm da bainha da primeira folha recém desenvolvida, ou seja, cerca de um terço das folhas foram removidas. Essa prática é comum em viveiros de mudas com o objetivo de diminuir a perda de vapor de água por transpiração no momento do transplântio para solo (Landell et al., 2012). Em seguida, as mudas foram transplantadas para os vasos preenchidos com solo e mantidas em 70% de CRA por sete dias e posteriormente, submetidas aos regimes de água no solo.

Após o transplântio, foram realizadas mais cinco fertirrigações com Si com aplicação no solo e com a pulverização foliar aos 20, 35, 50, 65 e 80 dias após o transplântio (Figura 1). A aplicação do Si via fertirrigação foi realizada simulando lâmina de 5 mm de solução silicatada, sendo aplicado 481 mL de solução via raízes por vaso considerando a área de  $962 \text{ cm}^2$ . A concentração de Si utilizada foi de  $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$ , correspondendo a  $33,7 \text{ mg}$  de Si por vaso, equivalente a  $3,5 \text{ kg ha}^{-1}$  de Si por aplicação. A pulverização foliar foi realizada usando pulverizador manual de modo a garantir o cobrimento da folha, sem que houvesse escorrimento. Em todas as pulverizações foliares de Si, a umidade relativa do ar foi superior a 60%, e a

temperatura, inferior a 30°C. O valor pH da solução fertirrigada foi ajustado para  $5,5 \pm 0,2$ . Foi realizado o equilíbrio da quantidade de potássio presente na fonte de Si ( $15,7 \text{ g L}^{-1}$  de K) nos tratamentos com ausência do elemento, utilizando uma solução de cloreto de potássio a  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  com aplicação via radicular e por pulverização foliar.

Os regimes de água no solo foram determinados a partir dos valores de microporosidade obtidos pelo método da mesa de tensão com coluna de água de 60 cm. Para isso, amostras de solo não perturbadas foram coletadas usando um anel volumétrico com volume ( $v$ ) igual a  $98,125 \text{ cm}^3$ , as amostras foram saturadas com água por 24 h, depois colocadas na mesa de tensão por 72 h e a massa foi medida (a), em seguida as amostras foram secas em estufa a  $110^\circ\text{C}$  por 24 h e a massa foi novamente medida (b). A microporosidade total (Mi):  $((a-b)/v)$  encontrada foi equivalente a 100% da CRA (Embrapa, 1997). No entanto, a condição ideal da água foi de 70% desse valor, pois permite que 70% dos microporos sejam preenchidos com água disponível e os 30% restantes com ar, mantendo a troca gasosa das raízes (Boaretto et al., 2014). Assim, os regimes hídricos no solo foram: 70% de CRA como regime hídrico adequado (controle) e 30% de CRA como déficit hídrico severo (DH) para cana-de-açúcar conforme indicado por Teixeira et al. (2020).

O manejo da irrigação foi realizado diariamente para que a umidade do solo, dentro de cada tratamento fosse a mínima variação possível, ou seja, insignificante para alterar a resposta biológica da planta. Assim, a massa de solo utilizada para preencher cada vaso foi controlada com alto rigor, além disso, a massa dos vasos também foi definida para descontar da massa total. A partir disso, foi utilizado o método de reposição de massa, considerando as perdas de água por evaporação do solo e da transpiração da planta, controlada diariamente a partir da pesagem dos vasos. Isso garantiu que as plantas fossem mantidas nos níveis de CRA propostos nos tratamentos, pois os ajustes foram realizados em todos os vasos. A mesma frequência de irrigação foi utilizada para ambas as espécies e para os tratamentos de irrigação, ou seja, todos foram pesados diariamente.

No momento da reposição da água, os vasos de 70% da CRA tinham aproximadamente 60% e os vasos de 30% da CRA tinham 25%. Justifica-se que

variação hídrica nos vasos de 70% da CRA foi maior porque as perdas por transpiração foram maiores devido ao crescimento das plantas. Além disso, as irrigações sempre foram feitas no mesmo horário do dia (às 17 h) porque foram realizados testes preliminares e a perda de água foi mais acentuada entre o período das 14 às 17 h, portanto, embora tenha havido variação, ela ocorreu apenas durante um período de 3 h por dia.

Aos 160 dias após o transplântio das mudas para os vasos com solo, correspondendo a fase de formação inicial dos colmos, o período de aplicação dos tratamentos com déficit hídrico foi encerrado e as plantas foram avaliadas conforme descrito a seguir.

## **2.3 Parâmetros avaliados**

### **2.3.1 Eficiência quântica do fotossistema II (PSII) (Fv/Fm)**

A eficiência quântica do PSII foi medida na primeira folha completamente desenvolvida utilizando um fluorômetro portátil (Os30P+, Opti-Sciences Inc., USA) no período de 7 às 8 h e de 13 às 14 h (Lichtenthaler et al., 2005).

### **2.3.2 Quantificação de clorofila e carotenoides**

Cinco discos foliares de 15 mg foram coletados no terço médio da lâmina foliar da primeira folha completamente desenvolvida. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro (DU640, Beckman, USA) a 663 nm para clorofila *a* (Chl *a*), 647 nm para clorofila *b* (Chl *b*) e 470 nm para carotenoides, conforme metodologia proposta por Lichtenthaler (1987), sendo o conteúdo definido com base na massa fresca.

### **2.3.3 Trocas gasosas foliares**

Os parâmetros de trocas gasosas foram avaliados no terço médio da primeira folha completamente desenvolvida, evitando a nervura central, com analisador de fotossíntese portátil (LcPro-SD, ADC BioScientificLtd., Hoddesdon, UK). Os dados foram coletados entre 9 e 11 h. As medições de trocas gasosas foram feitas em uma intensidade de luz constante de  $1.800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  emitida por uma fonte de luz LED

azul-vermelha, sob condições naturais de CO<sub>2</sub> (403-428 ppm) e a temperatura foliar foi mantida em 30±0,5°C.

As características fisiológicas medidas foram: fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (Gs) e concentração interna de CO<sub>2</sub> (Ci). A eficiência instantânea de uso de água (EUA) foi calculada pela razão entre A e E. A eficiência instantânea de carboxilação (EIC) foi calculada pela razão entre A e Ci.

### **2.3.4 Índice de extravasamento de eletrólitos (IEE)**

Foram coletados dez discos foliares (26,4 mm<sup>2</sup> cada) da primeira folha completamente desenvolvida em dois períodos (às 5 e às 14 h). Os discos foram emergidos em água deionizada por 2 h e a condutividade elétrica inicial (EC<sub>1</sub>) foi lida usando um medidor de condutividade (AK51, Akso, Brazil). As amostras foram autoclavadas a 121°C por 20 min e após o resfriamento a condutividade elétrica final (EC<sub>2</sub>) foi obtida. O índice de extravasamento de eletrólitos foi determinado considerando a fórmula:  $EC_1/EC_2 \times 100$  (Dionisio-Sese e Tobita, 1998).

### **2.3.5 Potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ )**

O potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) foi determinado no terço médio da lâmina da segunda folha completamente desenvolvida utilizando uma câmara de pressão de Scholander (3000F01, Soil Moisture Equipment, USA). A pressão foi aplicada até que houvesse exsudação da seiva na região do corte realizado no pecíolo foliar. As medidas foram realizadas no período de 5 às 6 h e de 13 às 14 h (Turner, 1981).

### **2.3.6 Conteúdo relativo de água**

Foram coletados dez discos (26,4 mm<sup>2</sup>) da primeira folha completamente desenvolvida em dois períodos (às 6 e às 14 h). Os discos foram imediatamente pesados para obter a massa fresca (Mf). Posteriormente, as amostras foram reidratadas em água deionizada por 6 h para obter a massa túrgida (Mt) e secas em estufa de circulação de ar forçado (TE-394/3-MP, Tecnal, Brazil) a 80°C por 24 h, para obter a massa seca (Ms). Os valores foram determinados pela equação proposta por Barrs e Weatherley (1962):  $[(Mf-Ms)/(Mt-Ms)] \times 100$ .

### **2.3.7 Conteúdo de fenóis totais**

A extração dos fenóis totais foi realizada utilizando amostras de folhas frescas coletadas da segunda folha completamente desenvolvida, que foram imediatamente pesadas e imersas em metanol concentrado e mantida no escuro por 3 h. O teor de fenóis totais foi determinado por reação colorimétrica induzida por folin-ciocalteau 2 N e carbonato de sódio 20%, com leitura em espectrofotômetro (B442, Micronal, Brazil) a 765 nm (Singleton e Rossi, 1965).

### **2.3.8 Conteúdo de prolina**

O conteúdo de prolina foi determinado em amostras da terceira folha completamente desenvolvida que foram coletadas e imediatamente congeladas em freezer -80°C. A reação níhidrina foi utilizada seguindo o método proposto por Bates et al. (1973), com medidas sendo realizadas em espectrofotômetro (Beckman DU 640) a 520 nm. Os valores foram estimados usando uma curva padrão e expressos com base na massa fresca.

### **2.3.9 Peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)**

O conteúdo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> foi determinado em amostras da terceira folha completamente desenvolvida que foram coletadas e imediatamente congeladas em freezer -80°C. A reação com iodeto de potássio foi utilizada seguindo o método de Alexieva et al. (2001). O material foi lido em espectrofotômetro (DU640, Beckman, USA) a 390 nm e o conteúdo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> determinado usando uma curva padrão e expressos com base na massa fresca.

### **2.3.10 Peroxidação lipídica**

A peroxidação lipídica foi determinada em amostras da terceira folha completamente desenvolvida que foram coletadas e imediatamente congeladas em freezer -80°C. Utilizou-se a estimativa do conteúdo de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico, conforme descrito por Heath e Packer (1968). A concentração de malondialdeído (MDA) foi determinada em espectrofotômetro (DU640, Beckman, USA) a 535 e 600 nm. Os dados foram calculados usando um coeficiente de extinção

de  $1,55 \times 10^{-5} \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  (Gratão et al., 2012), sendo expressos com base na massa fresca.

### **2.3.11 Enzimas antioxidantes**

Para análise enzimática, inicialmente foi obtido os extratos proteicos conforme Gomes-Junior et al. (2007) utilizando amostras da terceira folha completamente desenvolvida que foram coletadas e imediatamente congeladas em freezer  $-80^{\circ}\text{C}$ . As amostras foram maceradas em  $\text{N}_2$  líquido, homogeneizadas em tampão de fosfato de potássio contendo ácido etileno diaminotetracético, ditiotreitol e polivinilpolipirrolidona. O homogenato foi centrifugado e o sobrenadante armazenado em alíquotas a  $-80^{\circ}\text{C}$ . A concentração de proteínas totais foi determinada segundo o método de Bradford (1976).

#### **2.3.11.1 Catalase (CAT, EC 1.11.1.6)**

A atividade da catalase foi determinada utilizando os extratos proteicos com o método descrito por Kraus et al. (1995) com as modificações de Azevedo et al. (1998), sendo determinada a partir do monitoramento da degradação de  $\text{H}_2\text{O}_2$  a 240 nm durante 1 min.

#### **2.3.11.2 Superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1)**

A atividade da superóxido dismutase foi determinada de acordo com Giannopolitis e Ries (1977), a partir da medida da inibição da redução fotoquímica do cloreto de nitro azul tetrazólio, realizado em uma câmara de reação iluminada por uma lâmpada fluorescente de 15W a  $25^{\circ}\text{C}$ . A medição foi realizada em espectrofotômetro a 560 nm.

#### **2.3.11.3 Ascorbato peroxidase (APX, EC 1.11.1.11)**

A atividade da ascorbato peroxidase foi determinada pelo monitoramento da taxa de oxidação do ascorbato em 290 nm seguindo o método de Moldes et al. (2008).

### **2.3.12 Número de perfilhos, número de folhas verdes e percentual de folhas secas**

O número de perfilhos e número de folhas verdes foram obtidos a partir da 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.

### **2.3.13 Produção de massa seca**

As plantas foram separadas em folhas e colmos, posteriormente lavadas em água potável, solução detergente (0,1% v/v), solução de HCl (0,3% v/v) e água deionizada. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, Brazil) ( $65\pm 5^{\circ}\text{C}$ ), até atingir uma massa constante e obtido a massa seca de cada parte da planta.

### **2.3.14 Análise de Si**

Os teores de Si nas folhas e colmos foram obtidos pela extração do elemento de acordo com a metodologia descrita por Kraska e Breitenbeck (2010) e a leitura foi realizada por espectrofotômetro (B442, Micronal, Brazil) a 410 nm conforme indicado por Korndörfer et al. (2004). Com base no teor de Si e a massa seca de cada parte das plantas, calculou-se a acúmulo do elemento.

## **2.4 Análise estatística**

Os experimentos foram analisados independentemente para ambas as espécies. Para normalizar a variância, os dados percentuais do índice de extravasamento de eletrólitos, percentual de folhas seca e do conteúdo relativo de água foram transformados para o arco seno =  $\sqrt{x} / 100$ . Os dados foram submetidos à análise de variância bidirecional pelo teste F ( $p < 0,05$ ) após atender às premissas de normalidade (teste W de Shapiro-Wilks) e homogeneidade de variâncias (teste de Bartlett).

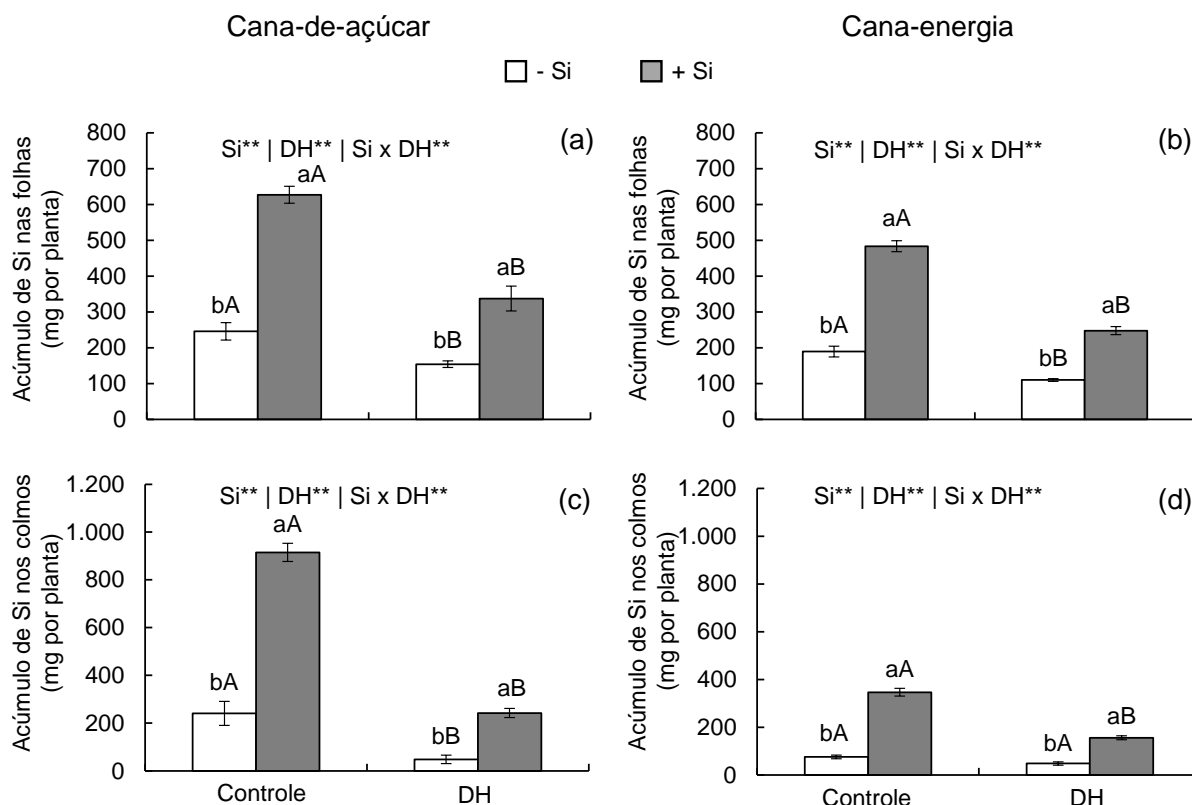
A análise fatorial foi utilizada para testar os principais efeitos do fornecimento de silício (Si) e dos regimes de água no solo (DH) e suas interações (Si  $\times$  DH), onde *N* foi de 20 unidades experimentais, em cada experimento. As médias foram

comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade por meio do software estatístico SAS® (Cary, NC, EUA).

### 3 Resultados

Na cana-de-açúcar, a aplicação de Si na fase de formação das mudas com complementação após o transplante aumentou o acúmulo do elemento nas folhas e nos colmos em 155% e 280%, no regime hídrico controle, e em 119% e 400% no déficit hídrico, respectivamente, em relação a -Si (Figura 2a, c). Na cana-energia com aplicação do Si também houve aumento no acúmulo do elemento nas folhas e nos colmos de 155% e 358% no regime hídrico controle, e de 125% e 225% sob déficit hídrico, respectivamente, em relação a -Si (Figura 2b, d).

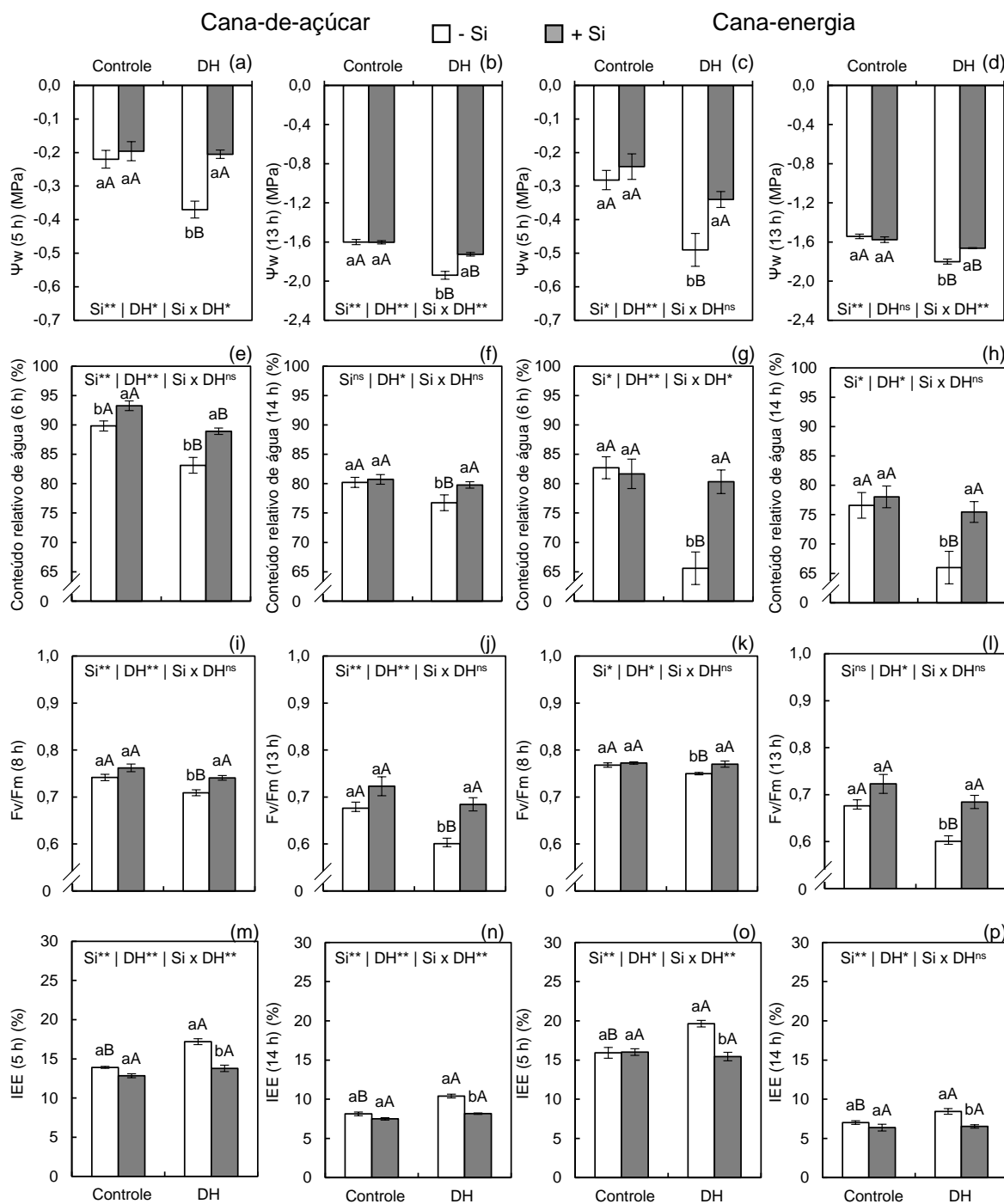
A cana-de-açúcar teve maior acúmulo de Si nos colmos em relação as folhas em plantas que receberam a fertirrigação associada a pulverização foliar de Si (Figura 2a, c). Já em plantas da cana-energia que receberam aplicação de Si, houve maior acúmulo do elemento nas folhas em comparação aos colmos (Figura 2b, d). O regime de déficit hídrico severo diminuiu o acúmulo de Si nas folhas e nos colmos da cana-de-açúcar em ambas as condições de fornecimento de Si (Figura 2a, c). Na cana-energia, o déficit hídrico em relação regime hídrico controle diminuiu o acúmulo de Si nas folhas e nos colmos em plantas sob +Si e apenas nas folhas de plantas sob -Si (Figura 2b, d).



**Figura 2.** Acúmulo de silício (Si) nas folhas e colmos em cana-de-açúcar (a, c) e cana-energia (b, d) na ausência (-Si) e presença de Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH) por período de 7 até 160 dias após o transplante. \*\*: significativo com  $p < 0,01$  pelo teste F. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças em relação ao Si no mesmo regime hídrico; e letras maiúsculas diferentes, em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si.  $n = 5$ . Si x DH: interação.

O potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) avaliado ao amanhecer (às 5 h) diminuiu com o déficit hídrico em plantas de cana-de-açúcar (Figura 3a) e de cana-energia (Figura 3c) cultivadas na ausência de Si, comparando-se com o regime hídrico controle. No entanto, o fornecimento do Si às plantas aumentou o  $\Psi_w$  na condição de déficit hídrico em relação a ausência de Si, mantendo-se inclusive semelhante ao de plantas cultivadas no regime hídrico adequado em ambas as espécies (Figura 3a, c).

Quando o  $\Psi_w$  foi medido no período mais quente do dia (às 13 h), a imposição do déficit hídrico diminuiu esse parâmetro em comparação com plantas cultivadas sob regime hídrico controle, tanto na presença quanto na ausência de Si em ambas as espécies (Figura 3b, d).



**Figura 3.** Potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ), conteúdo relativo de água, eficiência quântica do PSII (Fv/Fm) e índice de extravasamento de eletrólitos (IEE) em cana-de-açúcar (a, b, e, f, i, j, m, n) e cana-energia (c, d, g, h, k, l, o, p) na ausência (-Si) e presença de Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH) por período de 7 até 160 dias após o transplante. \*\* e \*: significativo com  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente e <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças em relação ao Si no mesmo regime hídrico; e letras maiúsculas diferentes, em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si.  $n = 5$ . Si x DH: interação.

Na ausência de Si, o déficit hídrico diminuiu o conteúdo relativo de água foliar avaliado às 6 e 14 h em plantas de cana-de-açúcar de cana-energia, em comparação a plantas sob regime hídrico adequado. O enriquecimento com Si nas plantas de ambas as espécies diminuiu as perdas no conteúdo de água foliar avaliado às 6 e 14 h no regime de déficit hídrico severo, em relação às plantas sob -Si, sendo inclusive semelhante ao de plantas sem estresse, exceto na avaliação às 6 h na cana-de-açúcar (Figura 3e-h).

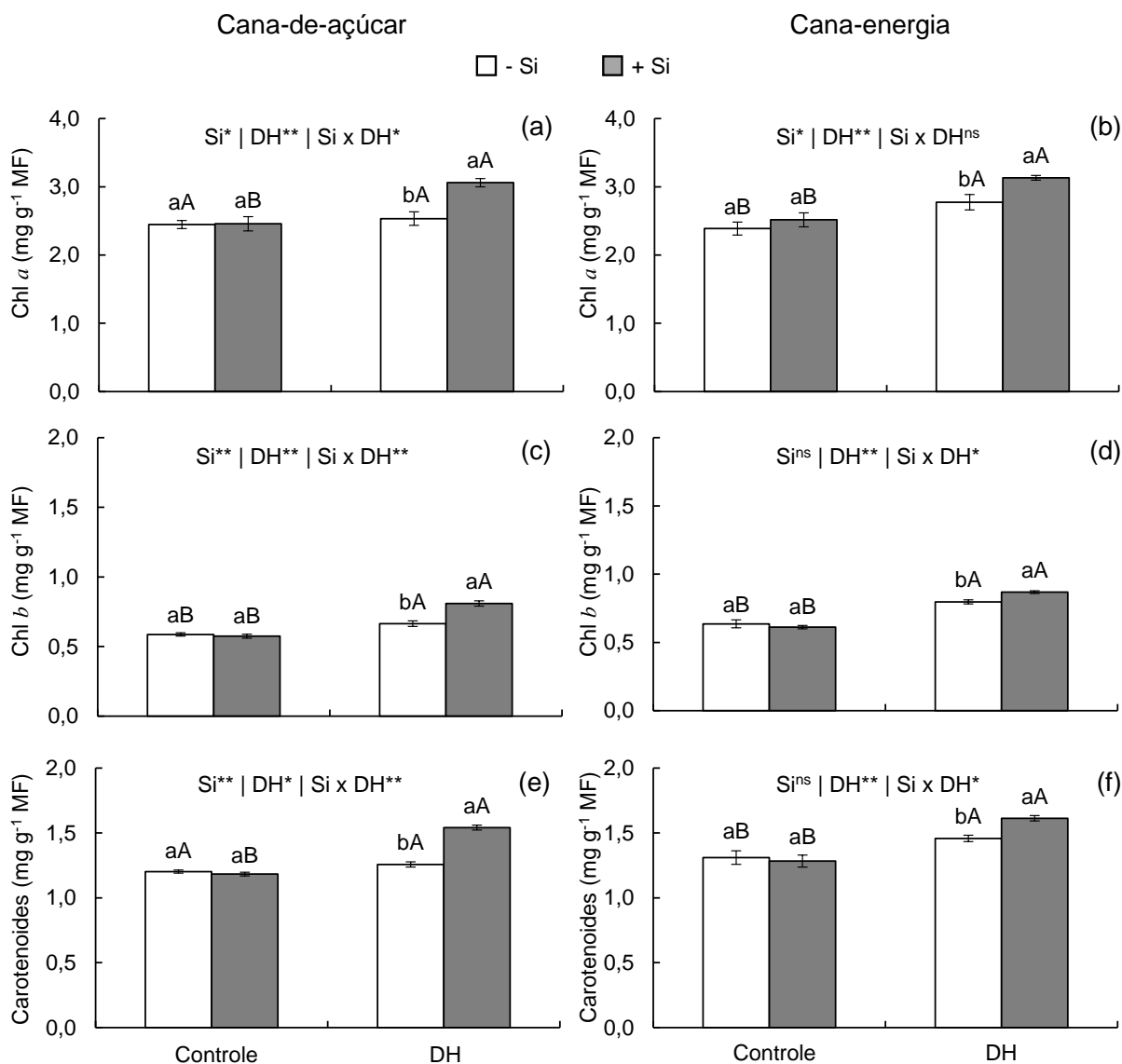
A eficiência quântica do PSII, expressa pelos valores de  $F_v/F_m$  avaliada às 8 e 13 h, foi diminuída na condição de déficit hídrico severo, em plantas de ambas as espécies que não receberam Si, em comparação às plantas sob regime hídrico controle (Figura 3i-l). A aplicação de Si em relação sua ausência aumentou a eficiência do PSII em plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia sob déficit hídrico, sendo semelhante a obtida em plantas sob regime hídrico controle nos dois períodos de avaliação (Figura 3i-l).

Na ausência de Si, o déficit hídrico em relação ao regime hídrico controle aumentou o IEE avaliado às 5 e 14 h, em ambas as espécies de cana. Contudo, o fornecimento de Si em relação a sua ausência impediu que houvesse aumento do extravasamento de eletrólitos em plantas de cana-de-açúcar e cana-energia sob déficit hídrico severo nos dois períodos de avaliação (Figura 3m-p). Esse resultado é semelhante ao observado em plantas do tratamento sem déficit hídrico na cana-de-açúcar (Figura 3m, n) e na cana-energia (Figura 3o, p).

Na cana-de-açúcar sob déficit hídrico e ausência de Si, o conteúdo de Chl *a* se manteve inalterada e o de Chl *b* aumentou no regime de déficit hídrico, em relação a condição hídrica controle (Figura 4a, b). O conteúdo de Chl *a* e Chl *b* aumentou em plantas da cana-energia cultivadas sob déficit hídrico severo quando não houve aplicação de Si, comparando-se com plantas sob regime hídrico adequado (Figura 4c, d). Mas com o fornecimento do elemento, a quantidade de Chl *a* e Chl *b* em plantas de ambas as espécies com déficit hídrico severo foi maior, em relação a plantas sob -Si no mesmo regime hídrico (Figura 4a-d).

Comparando-se com o regime hídrico controle, em plantas que não receberam Si a imposição do déficit hídrico no solo também proporcionou aumento no conteúdo

de carotenoides na cana-energia, mas não alterou na cana-de-açúcar. Porém, a nutrição das plantas com o elemento benéfico aumentou o conteúdo desse pigmento em ambas as espécies sob restrição hídrica, em relação as cultivadas em regime hídrico controle (Figura 4e, f).



**Figura 4.** Conteúdo de clorofila *a* (Chl *a*), *b* (Chl *b*) e carotenoides em cana-de-açúcar (a, c, e) e cana-energia (b, d, f) na ausência (-Si) e presença de Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH) por período de 7 até 160 dias após o transplântio. \*\* e \*: significativo com  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente e <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças em relação ao Si no mesmo regime hídrico; e letras maiúsculas diferentes, em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si.  $n = 5$ . Si x DH: interação. MF = massa fresca.

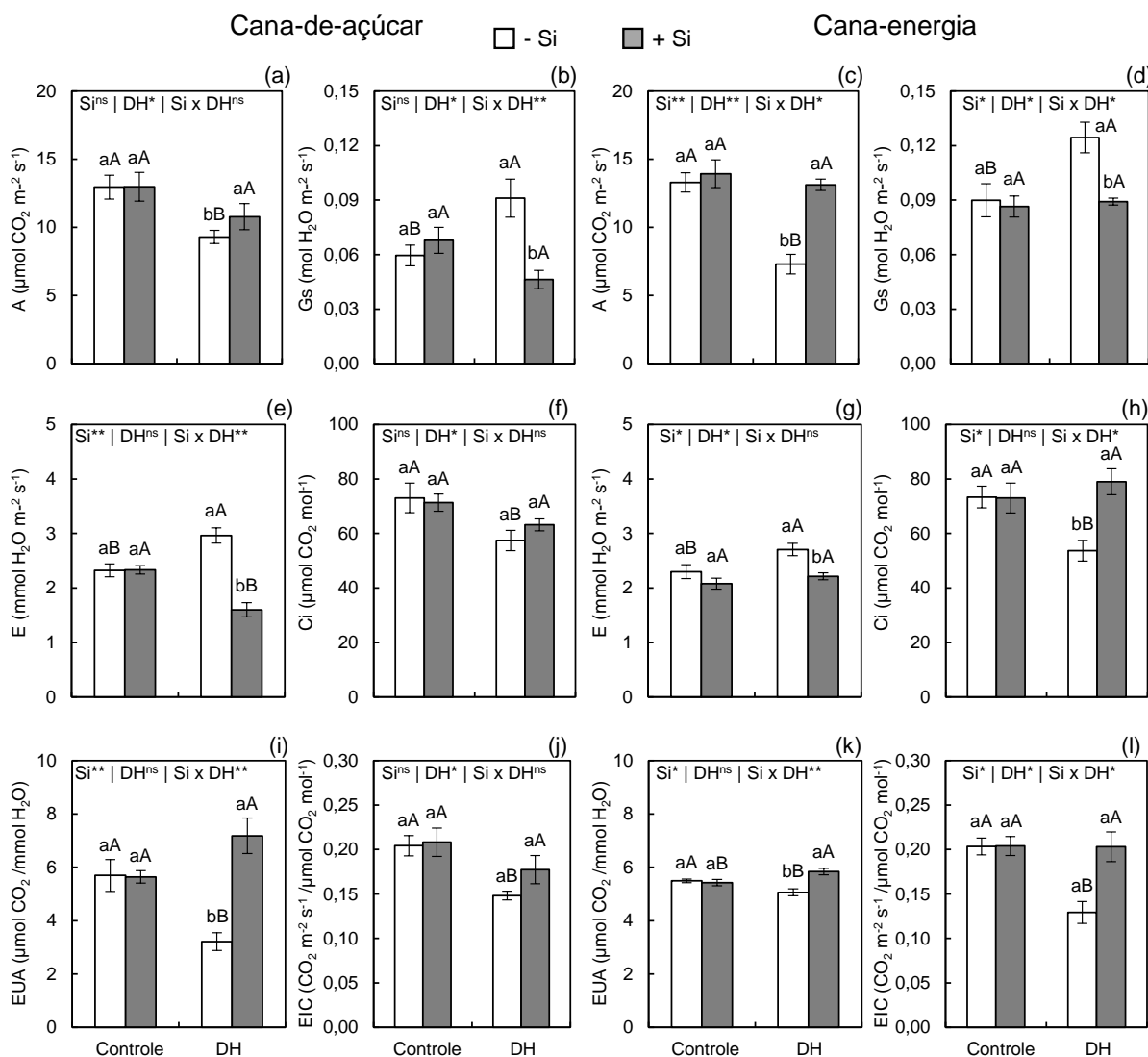
Na condição de déficit hídrico, a fotossíntese foi diminuída em plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia que não receberam Si, em relação a plantas cultivadas em regime hídrico controle. Contudo, sob déficit hídrico, o fornecimento de Si diminuiu as perdas na taxa fotossintética das plantas comparando-se com as cultivadas sob -Si, sendo inclusive semelhante ao de plantas sob condição hídrica controle nas duas espécies (Figura 5a, c).

A condutância estomática aumentou em plantas de ambas as espécies sob déficit hídrico e sem a fertilização com Si, em relação a suficiência hídrica. Mas o fornecimento de Si diminuiu a  $G_s$  de plantas de cana-de-açúcar e cana-energia submetidas ao regime de déficit hídrico severo, assemelhando-se ao de plantas sem estresse hídrico (Figura 5b, d).

Plantas cultivadas sob o regime de déficit hídrico e sem o fornecimento de Si tiveram maiores taxas de transpiração comparativamente ao de plantas cultivadas no regime hídrico controle. Contudo, o enriquecimento de Si nas plantas diminuiu a transpiração das duas espécies no regime de déficit hídrico, em relação ao de plantas que não receberam aplicação do elemento. Essa diminuição induzida pelo Si proporcionou taxas de transpiração menores na cana-de-açúcar e semelhantes na cana-energia as obtidas em plantas sem estresse (Figura 5e, g).

A concentração de  $C_i$  diminuiu em plantas da cana-de-açúcar e da cana-energia sob déficit hídrico e -Si, comparando com as de regime hídrico controle. No entanto, o fornecimento de Si aumentou o  $C_i$  de plantas da cana-energia sob déficit hídrico, em comparação as que não receberam o elemento, e esse aumento foi suficiente para que a concentração de  $C_i$  se igualasse ao de plantas não estressadas (Figura 5f, h).

A EUA das plantas cultivadas sem aplicação de Si foi diminuída em plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia sob déficit hídrico, em relação a de plantas cultivadas em regime hídrico adequado. Contudo, a EUA foi beneficiada pelo fornecimento de Si em plantas sob déficit hídrico, com aumentos de 123% e 15,2% na cana-de-açúcar e cana-energia, respectivamente, em comparação a plantas sob -Si (Figura 5i, k).



**Figura 5.** Fotossíntese (A), condutância estomática (Gs), concentração de carbono interno (Ci), transpiração (E), eficiência do uso da água (EUA) e eficiência instantânea de carboxilação (EIC) em cana-de-açúcar (a, b, e, f, i, j) e cana-energia (c, d, g, h, k, l) na ausência (-Si) e presença de Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH) por período de 7 até 160 dias após o transplante. \*\* e \*: significativo com  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças em relação ao Si no mesmo regime hídrico; e letras maiúsculas diferentes, em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si.  $n = 5$ . Si x DH: interação.

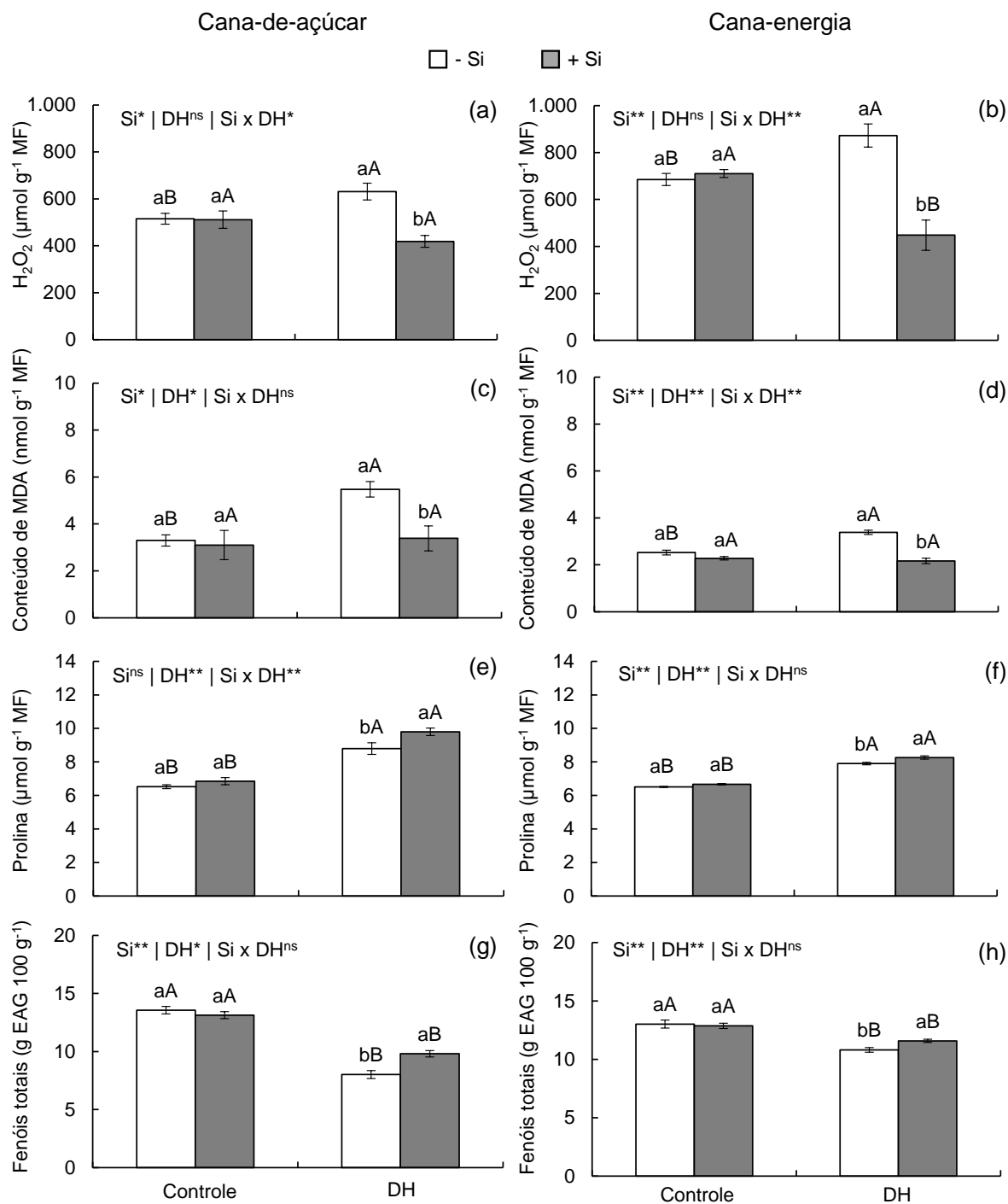
As plantas de ambas as espécies cultivadas sem o fornecimento de Si apresentaram menor EIC no regime de déficit hídrico, comparando-se as plantas sob regime hídrico controle. Contudo, a nutrição com Si proporcionou incremento na EIC

em plantas sob deficiência hídrica, em relação a -Si, sendo inclusive semelhante ao obtido em plantas sem estresse hídrico em ambas as espécies (Figura 5j, l).

Na ausência do fornecimento de Si, houve aumento da concentração de  $H_2O_2$  (Figura 6a, b) e da peroxidação lipídica, expressa pelo conteúdo de MDA (Figura 6c, d), em plantas das duas espécies cultivadas sob déficit hídrico severo, comparando com o regime hídrico controle. Contudo, o fornecimento de Si diminuiu o conteúdo de  $H_2O_2$  e a peroxidação lipídica em plantas de ambas as espécies sob déficit hídrico, em relação às plantas cultivadas em -Si (Figura 6a-d). A diminuição de  $H_2O_2$  e de MDA induzida pela Si tornou a concentração semelhante ao de plantas sem estresse na cana-de-açúcar (Figura 6a, c, d) e menor para o  $H_2O_2$  na cana-energia (Figura 6b).

O conteúdo de prolina aumentou com o déficit hídrico em ambas as condições de fornecimento de Si em plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia, em relação a plantas sem estresse. Porém, o aumento da concentração de prolina em plantas sob déficit hídrico foi acentuado com o fornecimento de Si, sendo maiores do que o obtido em plantas de ambas as espécies cultivadas em -Si (Figura 6e, f).

O cultivo das plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia sob déficit hídrico severo induziu diminuição do conteúdo de compostos fenólicos totais, independente da nutrição com Si, em relação ao obtido em plantas sob regime hídrico controle. No entanto, o fornecimento de Si diminuiu as perdas no conteúdo de fenóis totais em plantas de ambas as espécies sob déficit hídrico, em comparação com as cultivadas sem o fornecimento do elemento (Figura 6g, h).

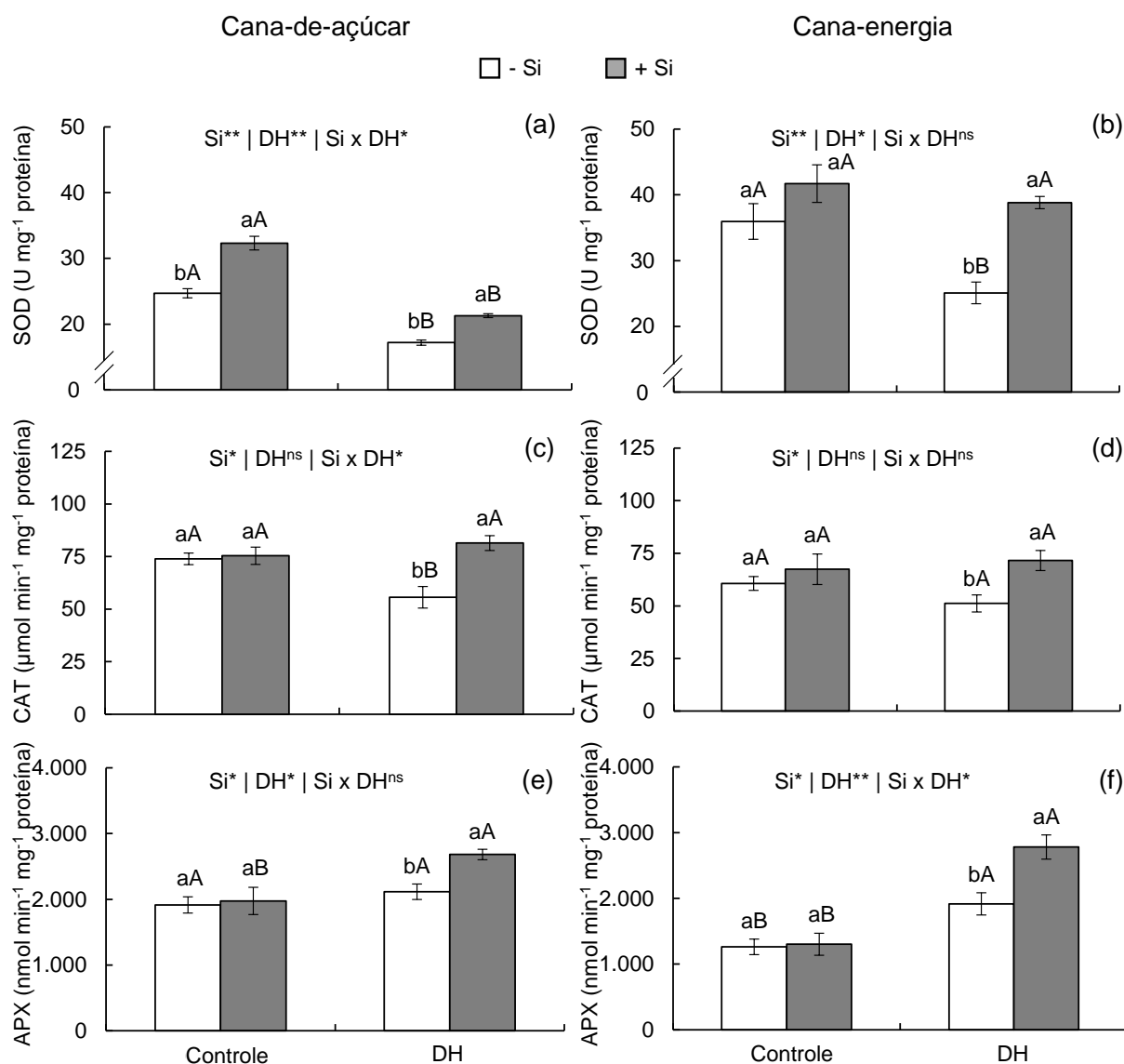


**Figura 6.** Conteúdo de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), de malondealdeído (MDA), de prolina e de fenóis totais em cana-de-açúcar (a, c, e, g) e cana-energia (b, d, f, h) na ausência (-Si) e presença de Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH) por período de 7 até 160 dias após o transplante. \*\* e \*: significativo com  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças em relação ao Si no mesmo regime hídrico; e letras maiúsculas diferentes, em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si.  $n = 5$ . Si x DH: interação. MF = massa fresca.

A atividade da SOD diminuiu com a imposição do déficit hídrico severo em plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia que não receberam a fertilização com Si. Mas essa diminuição foi totalmente revertida em plantas de cana-energia (Figura 7b) e apenas parcialmente na cana-de-açúcar (Figura 7a) com o fornecimento de Si, pois plantas sob +Si apresentaram maior atividade da SOD sob déficit hídrico, em relação a -Si. Contudo, na cana-de-açúcar foi observado aumento da atividade da SOD inclusive em plantas sem estresse, em comparação a -Si no mesmo regime hídrico (Figura 7a).

O cultivo de plantas da cana-de-açúcar e da cana-energia no regime de déficit hídrico severo causou diminuição na atividade da CAT, em relação a plantas sob regime hídrico controle. Contudo, o fornecimento de Si via fertirrigação associado com a pulverização foliar aumentou a atividade da CAT em plantas de ambas as espécies, em comparação a -Si, com valores semelhantes ao obtido em plantas sem estresse (Figura 7c-d).

Em relação ao regime hídrico controle, a atividade da APX aumentou em plantas submetidas ao déficit hídrico severo e sem o fornecimento de Si apenas na cana-energia, mantendo-se sem alteração na cana-de-açúcar. A fertilização com Si intensificou o aumento da atividade da APX em plantas das duas espécies sob regime de déficit hídrico, comparando-se a obtida em plantas não estressadas (Figura 7e-f).



**Figura 7.** Atividade específica da superóxido dismutase (SOD), da catalase (CAT) e da ascorbato peroxidase (APX) em cana-de-açúcar (a, c, e) e cana-energia (b, d, f) na ausência (-Si) e presença de Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH) por período de 7 até 160 dias após o transplante. \*\* e \*: significativo com  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente e <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças em relação ao Si no mesmo regime hídrico; e letras maiúsculas diferentes, em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si.  $n = 5$ . Si x DH: interação.

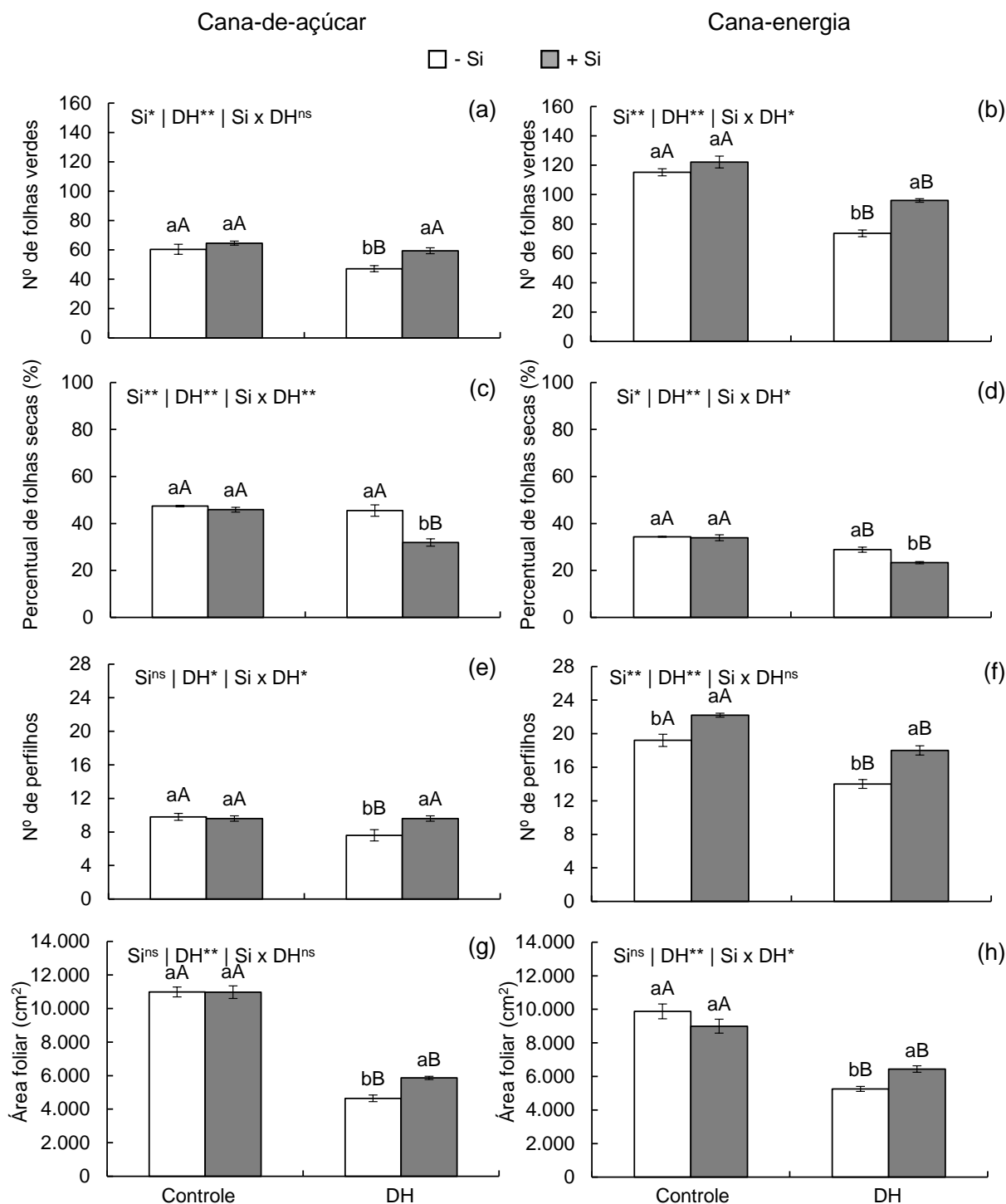
Na ausência de Si, o regime de déficit hídrico severo diminuiu o número de folhas verdes de ambas as espécies. No entanto, a nutrição com Si proporcionou um efeito benéfico que aumentou o número de folhas verdes de plantas sob déficit hídrico, em comparação ao de plantas sob -Si (Figura 8a, b), sendo observado valores

semelhantes aos obtidos em plantas cultivadas no regime hídrico controle na cana-de-açúcar (Figura 8a).

O percentual de folhas secas diminuiu em plantas de cana-energia sob déficit hídrico e sem o fornecimento de Si e se manteve inalterado em plantas de cana-de-açúcar, comparando-se com o cultivo em regime hídrico controle. Contudo, a nutrição com o Si causou diminuição do percentual de folhas secas em plantas de ambas as espécies sob déficit hídrico, em comparação com a condição de -Si (Figura 8c, d).

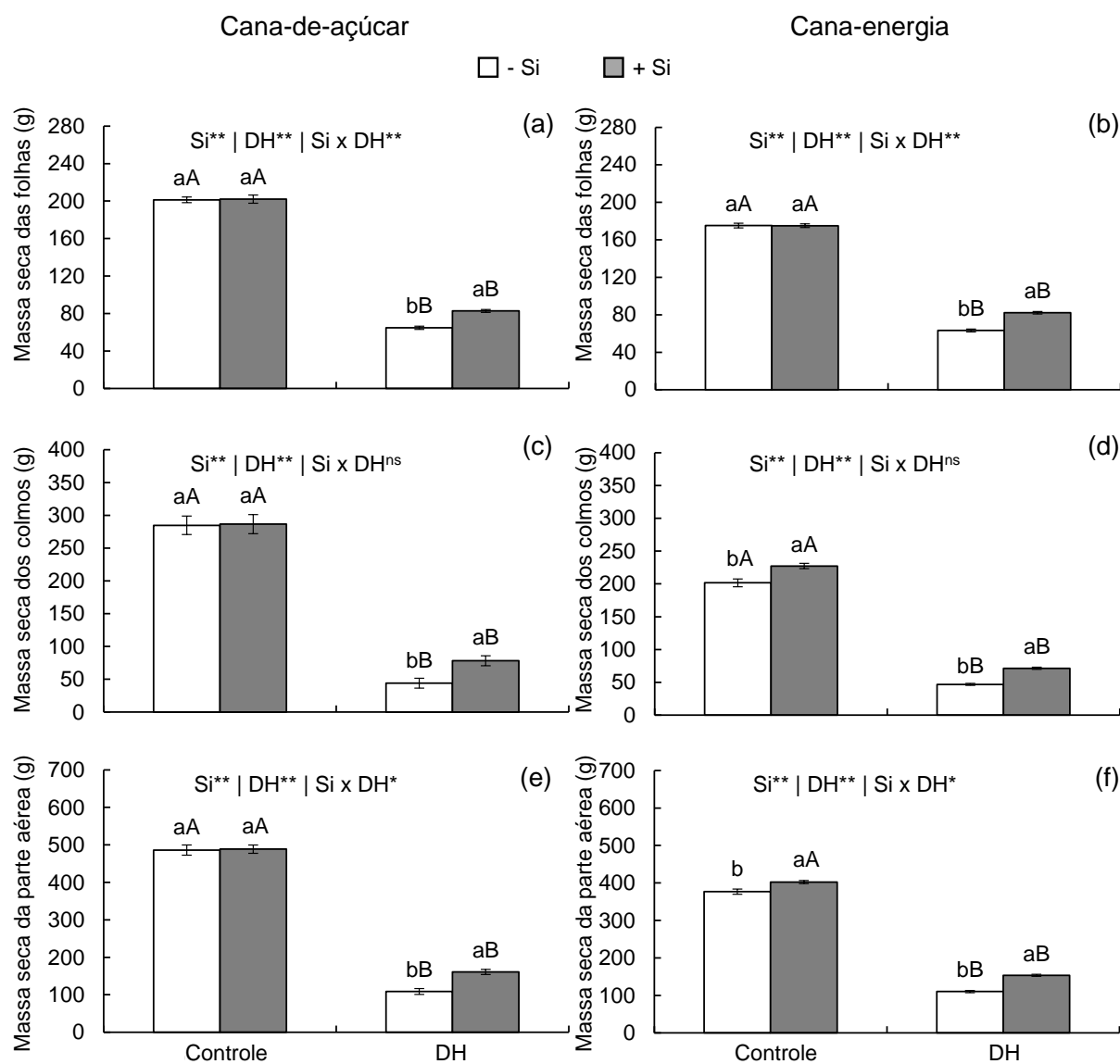
Na ausência do fornecimento de Si, o número de perfilhos diminuiu com o regime de déficit hídrico severo em ambas as espécies, em relação a suficiência hídrica. Mas a fertirrigação com Si aumentou o número de perfilhos da cana-de-açúcar e da cana-energia sob déficit hídrico (Figura 8e, f), sendo inclusive semelhante ao observado em plantas sob umidade adequada na cana-de-açúcar (Figura 8e). Nas plantas da cana-energia, o efeito benéfico do Si no aumento do perfilhamento também foi observado em plantas sob regime hídrico controle (Figura 8f).

A área foliar também foi diminuída com o déficit hídrico severo nas duas espécies, independentemente da nutrição com Si, em comparação a plantas sob regime hídrico adequado (Figura 8g, h). Contudo, em relação a condição de -Si, a aplicação de Si nas mudas com complementação após o transplântio incrementou o desenvolvimento da área foliar das plantas de cana-de-açúcar e cana-energia cultivadas sob déficit hídrico (Figura 8g, h).



**Figura 8.** Número de folhas verdes, percentual de folhas secas, número de perfilhos e área foliar em cana-de-açúcar (a, c, e, g) e cana-energia (b, d, f, h) na ausência (-Si) e presença de Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH) por período de 7 até 160 dias após o transplante. \*\* e \*: significativo com  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente e <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças em relação ao Si no mesmo regime hídrico; e letras maiúsculas diferentes, em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si.  $n = 5$ . Si x DH: interação.

A massa seca das folhas (Figura 9a, b), dos colmos (Figura 9c, d) e da parte aérea (Figura 9e, f) foram diminuídas com o cultivo das plantas sob regime de déficit hídrico severo até a fase de formação inicial dos colmos em ambas as espécies, comparando-se com a suficiência hídrica.



**Figura 9.** Massa seca das folhas, dos colmos e da parte aérea de cana-de-açúcar (a, c, e) e cana-energia (b, d, f) na ausência (-Si) e presença de Si aplicado via fertirrigação e foliar (+Si) em regime hídrico adequado (controle) e déficit hídrico severo (DH) por período de 7 até 160 dias após o transplante. \*\* e \*: significativo com  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente e <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças em relação ao Si no mesmo regime hídrico; e letras maiúsculas diferentes, em relação ao regime hídrico na mesma condição de fornecimento de Si.  $n = 5$ . Si x DH: interação.

Contudo, o fornecimento de Si diminuiu parcialmente as perdas associadas a produção de massa seca, proporcionando um aumento de 28%, 78% e 48% na cana-de-açúcar, e de 30%, 52% e 45% na cana-energia, para a massa seca das folhas, colmos e parte aérea, respectivamente, em relação às plantas sob regime hídrico controle (Figura 9a-f).

#### 4 Discussão

O déficit hídrico é um dos principais estresses ambientais que mais limitam o crescimento das plantas, diminuindo a produção agrícola (Schaller et al., 2020). O efeito prejudicial do déficit hídrico foi evidenciado neste estudo pois o cultivo sob regime hídrico de 30% de CRA por período de 7 até 160 dias após o transplante causou danos nas variáveis bioquímicas e fisiológicas, com reflexo na diminuição do crescimento tanto na cana-de-açúcar quanto na cana-energia. A sensibilidade da cana-planta de cana-energia ao déficit hídrico ainda não havia sido relatada, embora essa espécie esteja sendo utilizada no setor sucroalcooleiro para ampliar a cogeração de energia elétrica porque apresenta maior conversão energética em relação à cana-de-açúcar, devido à sua maior produção de massa seca e alto teor de fibras (Cursi et al., 2021). Essas características podem conferir maior resistência aos danos causados por estresses ambientais (Matsuoka et al., 2014). Contudo, com os resultados desse estudo, fica evidente que o déficit hídrico severo, que tem sido um cenário comum em regiões de regime hídrico instável (Bodner et al., 2015), afeta inclusive o crescimento da cana-energia em estágio mais avançado de desenvolvimento, na fase de formação inicial dos colmos.

O cultivo das plantas de ambas as espécies sob déficit hídrico severo até a fase de formação inicial dos colmos prejudicou o crescimento porque induziu estresse, provocado inicialmente pela diminuição do conteúdo de água no tecido foliar. O menor conteúdo de água ocorreu pela diminuição do  $\Psi_{w5}$  e  $\Psi_{w13}$  nas plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia (Figura 3a-d). Menores  $\Psi_w$  limitam a absorção de água pelo tecido foliar porque alteram a tensão da solução do xilema, que é transmitida através das colunas contínuas de água até às raízes (Pei et al., 2010; Ferreira et al., 2017). Associado a isso, houve aumento da  $G_s$  (Figura 5b, d) que resultou em maior  $E$  (Figura

5e, g) induzindo altas perdas de vapor de água que somadas com a limitação na absorção de água pelas raízes, diminuíram consideravelmente o conteúdo de água foliar (Figura 3e-h), evidenciando desequilíbrio do status hídrico.

Apesar do aumento da Gs e E, plantas sob déficit hídrico severo que não receberam aplicação de Si apresentaram menor concentração interna de CO<sub>2</sub> (Figura 5f, g) e eficiência instantânea de carboxilação (Figura 5j, k) que conseqüentemente diminuiu a taxa fotossintética das duas espécies (Figura 5a, c). Esses resultados sugerem que os danos causados pelo déficit hídrico na inibição da fotossíntese de plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia na fase de formação inicial dos colmos devem-se predominantemente a limitações não-estomáticas induzidas. Esse efeito tem sido relatado em plantas sob estresse severo (Ribeiro et al., 2013) devido a diminuição do teor de proteína solúvel total e de pigmentos fotossintéticos, promovendo ineficiência fotoquímica (Ribeiro et al., 2013) associada a diminuição da atividade de enzimas a fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPcase) e a ribulose-1,5-bifosfato carboxilase (Rubisco) (Inman-Bamber e Smith, 2005). No entanto, neste estudo, apesar de ter sido comprovado a ineficiência fotoquímica (Figura 3i-l), o conteúdo de pigmentos fotossintéticos, como clorofilas (Figura 4a-d) e carotenoides (Figura 4e, f) não foi afetado ou aumentou, sugerindo que houve limitações metabólicas na ação de enzimas ligadas ao metabolismo fotossintético causada pelo aumento do estresse oxidativo.

A inibição fotossintética colaborou para o aumento da produção de ERRO devido ao excesso de energia luminosa nos cloroplastos induzida pela diminuição da taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (Smirnoff, 1993). O acúmulo de ERO em plantas sob déficit hídrico severo na ausência de Si foi evidenciado pelo aumento do conteúdo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Figura 6a, b), causando instabilidade das membranas celulares refletindo em peroxidação lipídica, vistas pelo maior conteúdo de MDA (Figura 6c, d), considerando que ele funciona como um marcador para apontar a peroxidação lipídica (Kong et al., 2016). Essa condição também foi evidenciada pelo aumento do extravasamento de eletrólitos (Figura 3m-p), que é um parâmetro fisiológico que estima a integridade das membranas celulares (Bajji et al., 2002). O desequilíbrio na homeostase celular que agravou o acúmulo de ERO, também comprometeu a integridade de enzimas, causando prejuízos no sistema antioxidante secundário de defesa.

O sistema antioxidante de defesa das plantas é dividido em eliminadores de ERO enzimáticos e não-enzimáticos (Gratão et al., 2005). A SOD atua na primeira linha de eliminação enzimática de ERO, catalisando a conversão de  $O_2^-$  em  $H_2O_2$  dentro da célula (Ferreira et al., 2017). Neste estudo, a atividade da SOD foi diminuída em plantas sob déficit hídrico severo e sem o fornecimento de Si em ambas as espécies (Figura 7a, b). O segundo ponto de defesa enzimática antioxidante inclui a desintoxicação do  $H_2O_2$  que ocorre pela atuação da APX e da CAT que regulam os níveis redox nas células decompondo as moléculas de  $H_2O_2$  (Gratão et al., 2005). Assim, a avaliação da atividade dessas enzimas tem sido utilizada como mecanismos que avaliação da tolerância de plantas cultivadas sob condições de seca (Ferreira et al., 2017).

Neste estudo, ficou evidente que o déficit hídrico severo causou diminuição da atividade da CAT apenas na cana-de-açúcar (Figura 7c, d) e houve aumento da atividade da APX apenas na cana-energia (Figura 7e, f). Esses resultados demonstram que plantas de cana-de-açúcar possuem mecanismo de desintoxicação antioxidante enzimático menos eficiente em relação a cana-energia, ou seja, são mais sensíveis ao déficit hídrico. A atividade da APX também foi maior em plantas de sorgo sob déficit hídrico (Avila et al., 2021).

Além dos efeitos na ação do sistema enzimático de defesa, os danos causados pelo déficit hídrico severo afetaram o conteúdo de fenóis e de prolina que atuam no sistema de defesa antioxidante não-enzimático. O conteúdo de prolina aumentou com a imposição de déficit hídrico nas duas espécies (Figura 6e, f), comprovando a condição de estresse pois o acúmulo de aminoácidos livres tem sido relatado em plantas sob seca (Parveen et al., 2019; Avila et al., 2021; Teixeira et al., 2021) como uma estratégia para elevar a pressão osmótica e, portanto, atuando como um osmorregulador (Merwad et al., 2018).

O déficit hídrico também refletiu em diminuição do conteúdo de fenóis (Figura 6g, h). Os fenóis são substâncias bioativas que atuam como antioxidantes não-enzimáticos com ação na homeostase metabólica a partir da eliminação direta de oxigênio molecular ativo e do  $H_2O_2$  (Hiraga et al., 2001). Dessa forma, os fenóis protegem os tecidos celulares da ação de ERO, inibindo a peroxidação lipídica e

mantendo e a integridade das células (Sharma et al., 2012). No presente estudo, os teores de fenóis foram comparativamente menores em plantas sob déficit hídrico do que o de plantas sob regime hídrico adequado, essa diminuição colabora para justificar o alto acúmulo de  $H_2O_2$  e MDA nas duas espécies avaliadas (Figura 6a-d). Resultados semelhantes foram obtidos em plantas de milho (Parveen et al., 2019).

Essas alterações biológicas causadas pelo estresse oxidativo na planta diminuíram a eficiência de uso da água (Figura 5i, k), indicando prejuízos no aproveitamento da água disponível com efeitos no desenvolvimento das plantas cultivadas sob déficit hídrico até a fase de formação inicial dos colmos, visto pela diminuição da área foliar (Figura 8g, h), que é associada ao aumento da senescência e da abscisão das folhas, evidenciado pela diminuição do número de folhas verdes (Figura 8a, b) e pelo alto percentual de folhas secas (Figura 8c, d). A alta senescência foliar decorre do enrolamento das folhas e da diminuição da alongação celular (Herrero e Johnson, 1981), que foram intensificadas pela alta taxa de peroxidação lipídica, refletindo em intensas diminuições no perfilhamento (Figura 8e, f) e na produção de massa seca (Figura 9a-f) de ambas espécies. Os efeitos prejudiciais do déficit hídrico também foram relatados por Teixeira et al. (2021) e por Teixeira et al. (2020) em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar, mas por um período curto de 3 e 30 dias após o transplântio, respectivamente, e com efeitos restritos a variáveis fisiológicas e de crescimento.

Assim, apesar dos mecanismos biológicos variarem entre as espécies, fica evidente a sensibilidade da cana-de-açúcar e da cana-energia ao déficit hídrico severo até a fase de formação inicial dos colmos. Essa condição demonstra a necessidade de aumentar a tolerância dessas espécies, dado o aumento do plantio em áreas com deficiência hídrica recorrente, associado a ocorrência de escassez hídrica cíclica em diferentes regiões de cultivos. Diante disso, foi proposto enriquecer essas espécies com Si na fase de formação das mudas com complementação via fertirrigação associado com a pulverização foliar após o transplântio como uma estratégia para aumentar a resistência das plantas sob déficit hídrico.

O fornecimento de Si pela fertirrigação associado com a pulverização foliar proporcionou alta absorção do elemento nas duas espécies (Figura 2a-d),

demonstrando a viabilidade do uso para a adição de Si na fase de formação das mudas com complementação após o transplântio. A eficiência do fornecimento de Si deve-se ao manejo adequado da solução com uso de concentração que favorece a permanência do Si na forma monomérica que é absorvida pelas plantas (Mitani-Ueno e Ma, 2021), ou seja, abaixo de  $3 \text{ mmol L}^{-1}$  (Birchall, 1995). Associado a isso, houve benefício da fonte de Si adequada, que é solúvel e possui sorbitol que favorece a estabilidade das formas monoméricas do Si formando complexos orgânicos ao se ligar com esse poliálcool (Kubicki e Heaney, 2003), colaborando para absorção do elemento via raízes. Além disso, o sorbitol aumenta as propriedades umectantes da solução diminuindo o ponto de deliquescência da gota na superfície foliar (Babiker e Duncan, 1974) retardando a sua secagem e contribuindo para absorção do elemento pela superfície foliar. Assim, a fertirrigação associada com a pulverização foliar foi eficiente para o fornecimento de Si por induzir absorção pelos órgãos raízes e folhas.

A comprovada eficiência da fertirrigação com pulverização via foliar de Si reforça a sua aplicabilidade na fase de formação das mudas, pois essa técnica já é utilizada nos viveiros para aplicação de fertilizantes (Landell et al., 2012), permitindo o uso de baixas concentrações em alta frequência. Além disso, a complementação após o transplântio também pode ser utilizada dada a intensificação da área de cultivo de cana irrigada e pelo uso de irrigação de salvamento, que ocorre após o transplântio das mudas (ANA, 2021). Assim, acredita-se que a solução do solo pode ser enriquecida com Si a partir do seu fornecimento via fertirrigação, aumentando a concentração de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  na zona radicular. A fertirrigação associada a pulverização foliar amplia o aumento do acúmulo de Si nas plantas e maior efeito residual atenuando os danos causados pelo déficit hídrico severo por períodos de tempo mais longos, que podem se estender até a fase de formação inicial dos colmos.

Pode-se aceitar a hipótese de que o uso da fertirrigação associada com a pulverização foliar aplicada sobre as mudas durante a sua formação com complementação após o transplântio da cana-de-açúcar e da cana-energia permite alta absorção de Si com efeitos benéficos residuais mais duradouros na planta, estendendo-se até 160 dias de cultivo. Esse achado tem implicação prática importante pois deve ampliar o uso do Si nos cultivos de cana-de-açúcar irrigada, dada a baixa quantidade de Si empregada, próximo de  $20 \text{ kg ha}^{-1}$ , comparada as outras fontes de

menor solubilidade a exemplo do silicato de cálcio que exige doses acima de 1000 kg ha<sup>-1</sup> (Camargo et al., 2021). A eficiência da fertirrigação com Si em otimizar a absorção deste elemento já foi verificado em plantas forrageiras (Rocha et al., 2021), em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (Teixeira et al., 2021).

O aumento do acúmulo de Si induziu resposta biológica importante para sobrevivência das plantas sob regime de déficit hídrico severo, melhorando status de água nos tecidos celulares, por manter o potencial hídrico semelhante ao observado em plantas sem déficit hídrico nas primeiras horas do dia (Figura 3a, c), havendo variação apenas em horários de maior temperatura (Figura 3b, d). Esse ajuste no potencial hídrico foliar facilitou a absorção de água pelas plantas e aumentou o conteúdo relativo de água no tecido foliar (Figura 3e-h). O maior conteúdo de água no tecido foliar está relacionado, principalmente, às modificações físicas causadas pela deposição de sílica associada à celulose na epiderme foliar e abaixo da cutícula (Mitani-Ueno e Ma, 2021) que atua como uma barreira à perda de água e diminuiu a transpiração, fato comum em plantas acumuladoras de Si (Mitani et al., 2009) e que foi evidenciado neste estudo (Figura 5e, g). Isso ocorre porque o ácido monossilícico absorvido atinge as folhas pelo gradiente de transpiração (Mitani-Ueno e Ma, 2021), e se concentra induzindo a polimerização como sílica amorfa ou biogênica estando ligado a celulose da parede celular constituindo 90% do Si absorvido (Yoshida, 1965).

Plantas tratadas com Si também possuem maior conteúdo de água pela contribuição do elemento na absorção de água pelas raízes, pois ele induziu aumento do potencial hídrico pela ação osmorreguladora da prolina (Pei et al., 2010; Avila et al., 2021). Aliado a isso, pode ter havido aumento da atividade das aquaporinas, que são proteínas especializadas na absorção de água pelas plantas e que podem ter a expressão de seus genes ativada pelo Si (Abbas et al., 2015; Chen et al., 2016). Dessa forma, pode-se afirmar que plantas que receberam Si tiveram maior prevenção da desidratação do tecido vegetal por dois mecanismos associados: diminuição da perda e aumento da absorção de água pelos mecanismos discutidos anteriormente.

A manutenção da hidratação celular induzida pelo Si diminuiu os danos a atividade fotossintética em plantas submetidas ao déficit hídrico (Figura 5a-l) devido as modificações estomáticas e não-estomáticas. As modificações estomáticas foram

evidenciadas pela diminuição na  $G_s$  (Figura 5b, d) e  $E$  (Figura 5e, g) possivelmente pela polimerização de parte de sílica da superfície foliar (Mitani-Ueno e Ma, 2021). Contudo, apesar da diminuição da  $G_s$  houve aumento do  $C_i$  (Figura 5f, h) sugerindo o envolvimento de fatores não-estomáticos na ativação fotossintética (Verma et al., 2021).

Os fatores não-estomáticos estão associados ao ajuste bioquímico na prevenção e diminuição aos danos oxidativos nas plantas. A prevenção ficou evidenciada pela manutenção do status hídrico que evitou perdas na eficiência fotoquímica do PSII, demonstrada pelos maiores valores de  $F_v/F_m$  avaliadas pela manhã (Figura 3i, k) e no horário com maior temperatura (Figura 3j, l) em ambas as espécies. Esse aumento indica que o Si diminui os danos aos centros de reação do PSII pois a maior parte da radiação solar estava sendo usada na fase fotoquímica da fotossíntese (Verma et al., 2021) prevenindo contra a formação excessiva de ERO (Inman-Bamber e Smith, 2005). O aumento da eficiência fotoquímica pode ser atribuído ao maior conteúdo de clorofila *a* (Figura 4a, b), *b* (Figura 4c, d) e carotenoides (Figura 4e, f), que colaboram para manutenção da atividade fotossintética e evitam a exposição dos cloroplastos a altos níveis de energia de excitação (Smirnoff, 1993). Parveen et al. (2019) também relataram o efeito do Si no aumento de carotenoides, que são poderosos antioxidantes que diminuem a degradação de diferentes compostos orgânicos na planta, incluindo a clorofila.

Portanto, há uma maior transferência de energia luminosa dos carotenoides para as clorofilas, favorecendo a proteção das plantas contra o estresse (Inman-Bamber e Smith, 2005). Associado a isso, os efeitos do Si também podem ser atribuídos ao aumento da dissipação de ERO formados pela ativação dos mecanismos do sistema de defesa antioxidante enzimático (Figura 7a-f) e não-enzimático da planta (Figura 6e-h).

A atividade da SOD em plantas nutridas com Si aumentou em ambos regimes hídricos na cana-de-açúcar e sob déficit hídrico na cana-energia (Figura 7a, b), demonstrando que o Si colabora na inativação do oxigênio ativo por catalisar o  $O_2^-$  a  $H_2O_2$  e  $O_2$  (Gratão et al., 2005). Níveis mais elevados de atividade da SOD tem sido indicada como mecanismo que induz maior tolerância à seca a plantas de cana-de-

açúcar sob condições de déficit hídrico (Jangpromma et al., 2012). Dessa forma, pode-se indicar que o Si aumenta a tolerância das plantas sob déficit hídrico severo porque estimula a atividade da SOD e que a cana-de-açúcar é mais eficiente no uso desse mecanismo biológico pois essa resposta pode ser obtida inclusive em plantas sob condição hídrica adequada (Figura 7a, b). No entanto, apesar da formação de  $H_2O_2$  o seu conteúdo foi diminuído porque concomitante houve aumento na atividade das enzimas CAT (Figura 7c, d) e APX (Figura 7e, f) que o utilizam como substrato para formação de  $H_2O$  e  $O_2$  (Gratão et al., 2005). Esses resultados concordam com Bezerra et al. (2019) que relataram que a aplicação de Si fortaleceu o sistema de defesa antioxidante e diminuiu a peroxidação lipídica e os danos oxidativos em plantas de cana-de-açúcar sob estresse hídrico por deficiência hídrica.

Além da ativação do sistema antioxidante enzimático, o Si também proporcionou efeito benéfico na atuação de agentes antioxidantes não-enzimáticos, como prolina (Figura 6e, f) e compostos fenólicos (Figura 6g, h). O aumento concentração de prolina contribuiu para manter o ajuste osmótico celular, aumentando o potencial hídrico nas células por estimular aumento na homeostase celular (Avila et al., 2021). A prolina também pode atuar como uma chaperona molecular, protegendo a integridade das proteínas e mantendo ou incrementando a atividade de enzimas e assim, contribui como um sinalizador na dissipação de ERO (Szabados e Savouré, 2010). Dessa forma, o aumento da quantidade de prolina aprimorou o sistema de defesa das plantas fertilizadas com Si em ambas as espécies. Os teores de compostos fenólicos também foram comparativamente maiores em plantas de cana-de-açúcar e cana-energia que receberam o fornecimento de Si (Figura 5g, h). Esse aumento colaborou com a diminuição do acúmulo de ERO (Hiraga et al., 2001). O aumento no conteúdo de compostos fenólicos foi correlacionado com a diminuição da produção de ERO em plantas de milho sob déficit hídrico (Parveen et al., 2019).

Os mecanismos fisiológicos e bioquímicos modificados pelo Si no aumento da tolerância das plantas cultivadas sob deficiência hídrica proporcionaram aumento na eficiência no uso da água pelas plantas, que é um atributo fisiológico importante, principalmente quando elas estão sujeitas à seca (Gong e Chen, 2012). Neste estudo, o déficit hídrico diminuiu a eficiência de uso da água, que foi melhorada pelo fornecimento de Si (Figura 5i, k). O aumento da eficiência de uso da água pelo Si

também foi observado em plantas de cana-de-açúcar sob estresse hídrico, mas com a aplicação do elemento apenas via foliar (Verma et al., 2021).

A atenuação dos danos causados pelo déficit hídrico severo nas plantas, promovido pelo efeito benéfico do Si nos mecanismos biológicos discutidos, favoreceu o crescimento das plantas, diminuindo a senescência foliar, ou seja, percentual de folhas secas (Figura 8c, d), aumentando o número de folhas verdes (Figura 8a, b) e conseqüentemente a área foliar (Figura 8g, h), perfilhamento (Figura 8e, f) e produção de massa seca das folhas (Figura 9a, b), dos colmos (Figura 9c, d) e da parte aérea (Figura 9e, f). Dessa forma, a segunda hipótese deste estudo foi aceita indicando que o enriquecimento das plantas com Si aplicando na fase de formação com complementação após o transplântio proporciona efeito benéfico que atenua os danos causados pelo déficit hídrico até a fase de formação inicial dos colmos. Ficou evidenciado que isso ocorreu devido ao mecanismo induzido pelo Si que proporciona mudanças em parâmetros fisiológicos favorecendo a manutenção da hidratação celular, associada aos benefícios bioquímicos causados pelo aumento da atividade de antioxidantes enzimáticos e não-enzimáticos, promovendo diminuição do estresse oxidativo.

Cabe destacar que o benefício do Si no aumento da tolerância das plantas sob restrição hídrica ocorreu em período relativamente extenso de 7 até 160 dias após o transplântio, incluindo a fase de alta taxa de crescimento relativo da cultura, ou seja, indica a eficiência da produção de nova matéria seca sobre a já existente que ocorre próximo a 84 a 135 dias após o transplântio (Dingre et al., 2021). Portanto, a diminuição do estresse nesta fase pode inclusive repercutir beneficemente nos próximos estádios fenológicos da cultura.

A pesquisa também deixou claro que o emprego do Si nas condições deste trabalho pode viabilizar o uso da irrigação sub-ótima para cultivo destas espécies visando economia de água com ganhos ambientais expressivos pois trata de um recurso natural finito.

Assim, as perspectivas futuras é que novas pesquisas sejam realizadas em condição de campo para que possa ampliar o uso do Si para o cultivo sustentável da

cultura da cana-de-açúcar e da cana-energia em diferentes ciclos de produção e em áreas com ocorrências de seca.

## 5 Conclusão

O fornecimento de Si via fertirrigação associada a pulverização foliar na fase de formação de mudas com complementação após o transplântio é eficiente em aumentar o acúmulo do elemento nas plantas. O Si na planta atenua os danos causados pelo déficit hídrico severo até a fase de formação inicial dos colmos, mantendo o equilíbrio hídrico e fisiológico ao favorecer o sistema de defesa antioxidante em plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia.

A presente pesquisa sugere o fornecimento de Si na fase de mudas e após o transplântio para o solo como estratégia complementar em áreas com restrição hídrica durante a formação inicial de colmos da cana-de-açúcar e da cana-energia, especialmente em solos textura arenosa e com baixo teor de Si disponível.

## 6 Referências

Abbas T, Balal RM, Shahid MA, Pervez MA, Ayyub CM, Aqueel MA, Javaid M M (2015) Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. **Acta Physiology Plant** 37:1–15. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1768-5>

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

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 01 de abril de 2021.

Avila RG, Magalhães PC, da Silva EM, de Souza KRD, Campos CN, de Alvarenga AA, de Souza TC (2021) Application of silicon to irrigated and water deficit sorghum plants increases yield via the regulation of primary, antioxidant, and osmoregulatory

metabolism. **Agricultural Water Management** 255:107004.  
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107004>

Azevedo RA, Alas RM, Smith RJ, Lea PJ (1998) Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley. **Physiologia Plantarum** 104:280–292. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1998.1040217.x>

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

Bajji M, Kinet J-M, Lutts S (2002) The use of the electrolyte leakage method for assessing cell membrane stability as a water stress tolerance test in durum wheat. **Plant Growth Regulation** 36:61–70. <https://doi.org/10.1023/A:1014732714549>

Barrs H, Weatherley P (1962) A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. **Australian Journal of Biological Sciences** 15:413–428. <https://doi.org/10.1071/BI9620413>

Bates LS, Waldren RP, Teare ID (1973) Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil** 39:205–207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>

Besharat S, Barão L, Cruz C (2020) New strategies to overcome water limitation in cultivated maize: Results from sub-surface irrigation and silicon fertilization. **Journal of Environmental Management** 263:1-9.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110398>

Bezerra BKL, Lima GPP, Reis AR, Silva MA, Camargo MS (2019) Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum** 41:189. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>

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

Boaretto LF, Carvalho G, Borgo L, Creste S, Landell MGA, Mazzafera P, Azevedo R A (2014) Plant physiology and biochemistry water stress reveals differential antioxidant responses of tolerant and non-tolerant sugarcane genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry** 74:165-175. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.11.016>

Bodner G, Nakhforoosh A, Kaul HP (2015) Management of crop water under drought: a review. **Agronomy for Sustainable Development** 35:401–442. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0283-4>

Bradford MM (1976) A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry** 72:248–254

Camargo MS, Bezerra BKL, Holanda LA, Oliveira AL, Vitti AC, Silva MA (2019) Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 19:81–91. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>

Camargo MS, Fernández Honaine M, Osterrieth M, Bozza NG, Silva VM, Benvenuto ML, Silva MA (2021) 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**. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05063-z>

Cardozo NP, Bordonal RO, La Scala N (2018) Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. **Journal of Cleaner Production** 204:861–87. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.004>

Cavalcante VS, Prado RM, Vasconcelos RL, Campos CNS (2016) Iron concentrations in sugar cane (*Saccharum officinarum* L.) cultivated in nutrient solution. **Agrociência** 50:867–875

Chen D, Cao B, Wang S, Liu P, Deng X, Yin L, Zhang S (2016) Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific Reports** 6:1–14. <https://doi.org/10.1038/srep22882>

Cursi DE, Hoffmann HP, Barbosa GVS, Bressiani JA, Gazaffi R, Chapola RG, Fernandes Junior AR, Balsalobre TWA, Diniz CA, Santos JM, Carneiro MS (2021) History and current status of sugarcane breeding, germplasm development and molecular genetics in Brazil. **Sugar Tech**. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-00951-1>

Dingre SK, Gorantiwar SD, Kadam SA (2021) Correlating the field water balance derived crop coefficient (Kc) and canopy reflectance-based NDVI for irrigated sugarcane. **Precision Agriculture** 22:1134–1153. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09774-8>

Dionisio-Sese ML, Tobita S (1998) Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science** 135:1–9. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00025-9)

Embrapa (1997) **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 212p.

Epstein E (1994) The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences USA** 91:11–17. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>

FAO (2021) **The agricultural production indices**. In: Food Agric. Organ. United Nations. Disponível em <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em 05 maio de 2021.

Ferreira THS, Tsunada MS, Bassi D, Araújo P, Mattiello L, Guidelli GV, Righetto GL, Gonçalves VR, Lakshmanan P, Menossi M (2017) Sugarcane water stress tolerance mechanisms and its implications on developing biotechnology solutions. **Frontiers in Plant Science** 8:1–18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01077>

Firouzabadi AG, Baghani J, Jovzi M, Albaji M (2021) Effects of wheat row spacing layout and drip tape spacing on yield and water productivity in sandy clay loam soil in a semi-arid region. **Agricultural Water Management** 251:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106868>

Giannopolitis CN, Ries SK (1977) Superoxide dismutases. I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology** 59:309–314. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>

Gomes-Junior RA, Gratão PL, Gaziola SA, Mazzafera P, Lea PJ, Azevedo RA (2007) Selenium-induced oxidative stress in coffee cell suspension cultures. **Functional Plant Biology** 34:449–456. <https://doi.org/10.1071/FP07010>

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

Gratão PL, Monteiro CC, Carvalho RF, Tezotto T, Piotto FA, Peres LEP, Azevedo RA (2012) Biochemical dissection of diageotropica and *Never ripe* tomato mutants to Cd-stressful conditions. **Plant Physiology and Biochemistry** 56:79–96. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.009>

Gratão PL, Polle A, Lea PJ, Azevedo RA (2005) Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology** 32:481–494. <https://doi.org/10.1071/FP05016>

He SS, Zeng Y, Liang ZX, Jing Y, Tang S, Zhang B, Yan H, Li S, Xie T, Tan F, Li Ming (2021) Economic evaluation of water-saving irrigation practices for sustainable sugarcane production in Guangxi Province, China. **Sugar Tech** 1:1-7 <https://doi.org/10.1007/s12355-021-00965-9>

Heath RL, Packer L (1968) Photoperoxidation in isolated chloroplasts I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics** 125:189–198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)

Herrero MP, Johnson RR (1981) Drought stress and its effects on maize reproductive systems. **Crop Science** 21:105–110. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100010029x>

Hiraga S, Sasaki K, Ito H, Ohashi Y, Matsui H (2001) A large family of class III plant peroxidases. **Plant and Cell Physiology** 42:462–468. <https://doi.org/10.1093/pcp/pce061>

Hoagland DR, Arnon DI (1950) **The water-culture method for growing plants without soil**. Berkeley: Circular 247, 32p.

Inman-Bamber NG, Smith DM (2005) Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research** 92:185–202. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.023>

Jangpromma N, Thammasirirak S, Jaisil P, Songsri P (2012) Effects of drought and recovery from drought stress on above ground and root growth, and water use efficiency in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Australian Journal of Crop Science** 6:1298–1304

Katz O, Puppe D, Kaczorek D, Prakash NB, J Schaller (2021) Silicon in the soil–plant continuum: Intricate feedback mechanisms within ecosystems. **Plants** 10:1–36. <https://doi.org/10.3390/plants10040652>

Kong W, Liu F, Zhang C, Zhang J, Feng H (2016) Non-destructive determination of Malondialdehyde (MDA) distribution in oilseed rape leaves by laboratory scale NIR hyperspectral imaging. **Scientific Reports** 6:1–8. <https://doi.org/10.1038/srep35393>

Korndörfer GH, Pereira HS, Nolla A (Eds) (2004) Análise de silício no solo, planta e fertilizantes. Uberlândia: UFU, 50p.

Kraska JE, Breitenbeck GA (2010) Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 41:2075–2085. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>

Kraus TE, McKersie BD, Fletcher RA (1995) Paclobutrazol-induced tolerance of wheat leaves to paraquat may involve increased antioxidant enzyme activity. **Journal of Plant Physiology** 145:570–576. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81790-6](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81790-6)

Kubicki JD, Heaney PJ (2003) Molecular orbital modeling of aqueous organosilicon complexes: Implications for silica biomineralization. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 67:4113–4121. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00093-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00093-3)

Landell MGA, Campana MP, Figueiredo P, Xavier MA, Anjos I A, Dinardo-Miranda LL, Scarpari MS, Garcia JC, Bidóia MAP, Silva DN, Mendonça JR, Kanthack RAD, Campos MF, Brancalião SR, Petri RH, Miguel PEM (2012). **Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 22p (Documentos, 109).

Lichtenthaler HK (1987) Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology** 148:350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)

Lichtenthaler HK, Buschmann C, Knapp M (2005) How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio RFd of leaves with the PAM fluorometer. **Photosynthetica** 43:379–393. <https://doi.org/10.1007/s11099-005-0062-6>

Lisboa CC, Butterbach-Bahl K, Mauder M, Kiese R (2011) Bioethanol production from sugarcane and emissions of greenhouse gases - known and unknowns. **GCB-Bioenergy** 3:277–292. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01095.x>

Matsuoka S, Kennedy AJ, Santos EGD, Tomazela A L, Rubio LCS (2014) Energy cane: Its concept, development, characteristics, and prospects. **Advances in Botany** 2014:1–13. <https://doi.org/10.1155/2014/597275>

Merwad A-RMA, Desoky E-SM, Rady MM (2018) Response of water deficit-stressed *Vigna unguiculata* performances to silicon, proline or methionine foliar application. **Scientia Horticulturae (Amsterdam)** 228:132–144. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.10.008>

Mitani-Ueno N, Ma JF (2021) Linking transport system of silicon with its accumulation in different plant species. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 67:10–17. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1845972>

Mitani N, Yamaji N, Ma JF (2009) Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology** 50:5–12. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcn110>

Moldes CA, Medici LO, Abrahão OS, Tsai SM, Azevedo RA (2008) Biochemical responses of glyphosate resistant and susceptible soybean plants exposed to glyphosate. **Acta Physiologiae Plantarum** 30:469–479. <https://doi.org/10.1007/s11738-008-0144-8>

Parveen A, Liu W, Hussain S, Asghar J, Perveen S, Xiong Y (2019) Silicon priming regulates morpho-physiological growth and oxidative metabolism in maize under drought stress. **Plants** 8:1–14. <https://doi.org/10.3390/plants8100431>

Pei ZF, Ming DF, Liu D, et al (2010) Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. **Journal of Plant Growth Regulation** 29:106–115. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9120-9>

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

Ramesh P (2000) 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** 185:83-89 <https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2000.00404.x>

Ribeiro R V., Machado RS, Machado EC, Machado DFSP, Magalhães Filho JR, Landell MGA (2013) Revealing drought-resistance and productive patterns in sugarcane genotypes by evaluating both physiological responses and stalk yield. **Experimental Agriculture** 49:212–224. <https://doi.org/10.1017/S0014479712001263>

Rocha JR, de Mello Prado R, Teixeira GCM, de Oliveira Filho ASB (2021) Si fertigation attenuates water stress in forages by modifying carbon stoichiometry, favouring physiological aspects. **Journal of Agronomy and Crop Science** 1:1–13. <https://doi.org/10.1111/jac.12479>

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho MR, Almeida JÁ, Araújo Filho JC, Oliveira JB, Cunha TJ (2018) **Brazilian soil classification system**, 2a. Brasília: Embrapa Soils.

Schaller J, Cramer A, Carminati A, Zarebanadkouki M (2020) Biogenic amorphous silica as main driver for plant available water in soils. **Scientific Reports** 10:1-7. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59437-x>

Sharma P, Jha AB, Dubey RS, Pessarakli M (2012) Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany** 2012:1-26. <https://doi.org/10.1155/2012/217037>

Singleton VL, Rossi JAJ (1965) Colorimetry to total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture** 16:144-58

Smirnoff N (1993) The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation. **New Phytologist** 125:27–58. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1993.tb03863.x>

Szabados L, Savouré A (2010) Proline: a multifunctional amino acid. **Trends in Plant Science** 15:89–97. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.11.009>

Teixeira GCM, Prado R de M, Rocha AMS, Santos LCN dos, Sarah MM dos S, Gratão PL, Fernandes C (2020) Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the

effects of water deficit after transplanting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 20:849–859. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00170-4>

Teixeira GCM, Mello Prado R, Rocha AMS (2021) Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water deficit damage in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science** 00:1–10. <https://doi.org/10.1111/jac.12511>

Turner NC (1981) Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. **Plant and Soil** 58:339–366. <https://doi.org/10.1007/BF02180062>

Verma KK, Song X-P, Zeng Y, Guo DJ, Singh M, Rajput VD, Malviya MK, Wei KJ, Sharma A, Li DP, Chen GL, Li YR (2021) 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** 166:582–592. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.032>

Yoshida S (1965) Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant. **Bull Natl Institute of Agricultural Science Ser B** 15:1–58

## **CAPÍTULO 4 – Acúmulo de Si prolonga a mitigação do déficit hídrico em cana-de-açúcar e em cana-energia por modificar estequiometria Si:C:N:P e incrementar a eficiência nutricional**

**RESUMO** - As mudanças climáticas têm prolongado a ocorrência de déficit hídrico nas regiões de cultivo da cana-de-açúcar e da cana-energia, exigindo soluções urgentes e sustentáveis para atenuar os danos nas plantas. Sugere-se que essa condição induza um desequilíbrio da homeostase estequiométrica C:N:P nessas espécies prejudicando as taxas de conversão dos nutrientes acumulados em biomassa, mas esses danos podem ser atenuados pelo fornecimento de silício (Si) havendo necessidade de maior compreensão destes mecanismos. Assim, realizou-se essa pesquisa objetivando avaliar os efeitos benéficos do Si aplicado via fertirrigação associado com a pulverização foliar na atenuação dos danos causados pelo déficit hídrico severo em período intermediário e longo após o transplântio, na manutenção da homeostase nutricional e no aumento da eficiência de uso do C, N e P em plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia. Para tanto, foram realizados quatro experimentos em condição controlada durante o primeiro ciclo de crescimento das duas espécies. Inicialmente, foram avaliados o efeito da fertirrigação associada com pulverização foliar de Si aplicada somente na fase de formação de mudas em plantas de cana-de-açúcar (experimento I) e de cana-energia (experimento II) cultivadas sob déficit hídrico severo por período de 7 a 60 dias após o transplântio (período intermediário). Posteriormente, avaliou-se o efeito do Si nos mesmos modos de aplicação na fase de mudas e com complemento após o transplântio em plantas de cana-de-açúcar (experimento III) e cana-energia (experimento IV) cultivadas sob déficit hídrico severo por período de 7 a 160 dias após o transplântio (período longo). O fornecimento de Si diminuiu os teores de C em ambos os regimes hídricos de plantas da cana-de-açúcar e da cana-energia. O Si aplicado via fertirrigação e foliar modificou a relação C:N:P e aumentou a eficiência de uso de C, N e P em plantas sob déficit hídrico em período intermediário e longo após o transplântio. Em conclusão, a aplicação de Si pode ser usada para fornecer esse elemento a planta pois exerce efeitos benéficos que revertem parcialmente os danos na homeostase nutricional e aumentam as eficiências nutricionais em plantas sob déficit hídrico severo. Os efeitos benéficos variam com a época de aplicação do elemento, sendo que quando o Si é aplicado apenas durante a formação das mudas os efeitos atenuam danos causados pelo déficit hídrico severo de prazo intermediário, especialmente, em plantas de cana-de-açúcar. Realizando-se uma complementação com aplicação de Si após o transplântio, os efeitos mitigadores estendem-se para ambas as espécies sob déficit hídrico severo por longo período após o transplântio.

**Palavras-chave:** elemento benéfico, estresse abiótico, homeostase nutricional, *Saccharum officinarum* L., *Saccharum spontaneum* L.

## **Silicon modifies the C:N:P ratio and increases the nutritional efficiency of sugarcane and energy cane under severe water deficit in two stages of development**

**ABSTRACT** - Climate change has prolonged the occurrence of water deficit in sugarcane and energy cane growing regions, demanding urgent and sustainable solutions to mitigate damage to plants. It is suggested that this condition induces an imbalance of C:N:P stoichiometric homeostasis in these species, impairing the conversion rates of accumulated nutrients in biomass. These damages can be mitigated by the residual effect of silicon (Si) but there is a need for a better understanding of these mechanisms. Thus, this research was carried out in order to evaluate the beneficial effects of Si applied via fertigation associated with foliar spraying in the attenuation of the damage caused by severe water deficit severe in the intermediate and long period after transplantation, in the maintenance of homeostasis nutritional and increase the efficiency of use of C, N and P in sugarcane and energy cane plants. Therefore, four experiments were carried out under controlled conditions during the first growth cycle of the two species. Initially, the effect of fertigation associated with Si foliar spraying applied only in the seedling formation phase in sugarcane (experiment I), and energy cane (experiment II) plants cultivated under severe water deficit for a period were evaluated 7 to 60 days after transplanting (intermediate period). Subsequently, the effect of Si was evaluated in the same times of application in the seedling stage and with complement after transplanting in sugarcane (experiment III) and energy cane (experiment IV) plants cultivated under severe water deficit by period from 7 to 160 days after transplantation (long period). Si supply decreased C concentrations in both water regimes of sugarcane and energy cane plants. The Si applied via fertigation and foliar modified the C:N:P ratio and increased the efficiency of C, N and P use in plants under water deficit in the intermediate and long periods after transplanting. In conclusion, Si application can be used to supply this element to the plant as it exerts beneficial effects that partially reverse the damage to nutritional homeostasis and increase nutritional efficiencies in plants under severe water deficit. Beneficial effects vary with the time of application of element, and when Si is applied only during the formation of seedlings, the effects attenuate damage caused by the severe water deficit of intermediate term (up to 60 days), especially in sugarcane plants. By carrying out complementation with Si application after transplanting, the mitigating effects extend to both species under severe water deficit for long period after transplantation.

**Keywords:** beneficial element, abiotic stress, nutritional homeostasis, *Saccharum officinarum* L., *Saccharum spontaneum* L.

## 1 Introdução

As áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar e de cana-energia têm expandido para regiões com menor disponibilidade hídrica e estima-se que aumentem no futuro devido as mudanças climáticas (Besharat et al., 2020). O déficit hídrico nas plantas é mais intenso em regiões com solos arenosos e com baixa capacidade de retenção de água (Schaller et al., 2020), causando severos danos em aspectos fisiológicos, que iniciam por desequilíbrio no status hídrico (Teixeira et al., 2020a) e causam diminuição na taxa fotossintética (Verma et al., 2021); além de afetar aspectos bioquímicos, interferindo na ação de antioxidantes de defesa enzimáticos (Bezerra et al., 2019) e não-enzimáticos (Teixeira et al., 2021), e conseqüentemente, no desenvolvimento e na produção de massa seca das plantas.

Contudo, tem surgido novos enfoques sobre os efeitos do déficit hídrico na planta que se refere a modificação da estequiometria C:N:P. O estudo da estequiometria envolve avaliação do equilíbrio de elementos químicos, especialmente C, N e P em sistemas vivos (Elser e Hamilton, 2007). Assim, existem indicações que o déficit hídrico ao causar modificação da homeostase estequiométrica elementar induz desequilíbrio nutricional e isso constitui um dos fatores responsáveis por diminuir o crescimento das plantas (Teixeira et al., 2020b), e pode se agravar, especialmente em período de seca mais longo (Cardozo et al., 2018).

Para diminuir os danos do déficit hídrico nos cultivos de cana-de-açúcar tem-se como opção o uso do silício (Si), mas os estudos predominam avaliando apenas os processos fisiológicos (Bezerra et al., 2019; Teixeira et al., 2020a; Teixeira et al., 2021; Camargo et al., 2021; Verma et al., 2021). Essa espécie é beneficiada por ser uma Poaceae acumuladora deste elemento, pois possui eficiente mecanismo de absorção ativo por ação de transportadores das membranas (Mitani-Ueno e Ma, 2021). O Si contido nas plantas predomina nas paredes celulares como sílica amorfa (Neethirajan et al., 2009) e em complexos orgânicos como a celulose (Yoshida, 1965), hemicelulose (He et al., 2015) e outros componentes da parede celular, sugerindo que isso exerce papel importante no aumento do crescimento vegetal (Isa et al., 2010).

Assim, a formação destes compostos sílico-orgânico na parede celular teria síntese com baixo custo energético (Raven, 1983) diferentemente da lignina que tem custo energético elevado, mas sua síntese pode ser diminuída pela sinalização do Si (Schoelynck et al., 2010). Isso induz diminuição do teor de C da parede celular que pode refletir nas folhas das plantas que receberam Si modificando a razão estequiométrica C:Si especialmente sob déficit hídrico, visto em forrageiras (Rocha et al., 2021), embora isso possa ocorrer em plantas sem estresse como na cultura do trigo (Neu et al., 2017).

Assim, o efeito benéfico do Si na atenuação do déficit hídrico em plantas de cana-de-açúcar ocorreria devido a homeostase estequiométrica elementar envolvendo além do C os nutrientes estruturais N e o P que favoreceria equilíbrio das funções nutricionais destes elementos nas plantas e conseqüentemente, na eficiência nutricional. Esses efeitos do Si nesta Poaceae visando atenuar os danos do déficit hídrico ainda é muito incipiente, havendo apenas um estudo em plantas de cana-de-açúcar jovem, mas com período de estresse hídrico muito restrito de apenas 30 dias (Teixeira et al., 2020b). Assim, existe uma dúvida se houver período de déficit hídrico mais extenso de dois ou até cinco meses, que é mais comum em áreas cultivadas com cana-de-açúcar ou cana-energia, poderia anular ou diminuir esse benefício do Si na homeostase estequiométrica C:N:P e conseqüentemente, no ganho de biomassa das plantas.

Para ter esse efeito benéfico do Si é primordial potencializar a eficiência de aplicação e da absorção do elemento pela planta que pode ocorrer na fase de formação da muda pré-brotada ou após o seu transplântio para o solo. Para produção da muda é utilizado mini-rebolo que seria pequena fração do colmo contendo uma gema utilizado para a formação de uma muda-pré-brotada sendo uma inovação importante no sistema de propagação da cana-de-açúcar (Landell et al., 2012). Nesta fase a muda é cultivada em substrato inerte em viveiro com duração de 60 a 70 dias após a emergência do broto. O fornecimento de Si nesta fase permitiria alto enriquecimento deste elemento nas mudas para aumentar a possibilidade de um efeito benéfico residual do Si atenuando danos causados pelo déficit hídrico severo em período intermediário de até 60 dias após o transplântio (i) uma fase muito sensível da cultura havendo alto risco de morte das mudas dada pouca reserva (água) (Dingre

et al., 2021). Cabe destacar que nesta fase (i) cerca de 1/3 das folhas da planta são cortadas antes do transplântio para o solo com objetivo de diminuir a perda de água (Landell et al., 2012), mas também diminui a quantidade do elemento benéfico da muda.

Assim, pretendeu-se avaliar se as fertirrigações e pulverizações foliares de Si na fase (i) e com aplicações complementares após o transplântio para o solo poderia estender os efeitos induzidos pelo Si no alívio dos danos do déficit hídrico severo no período relativamente longo de até 7 a 160 dias após o transplântio, ou seja, até na fase inicial de alongamento dos colmos (ii). Esse período de déficit hídrico é também crítico pois coincide com fase de alta taxa de crescimento relativo da cultura (Dingre et al., 2021) e conseqüentemente, pode afetar as próximas fases fenológicas, especialmente o alongamento dos colmos das espécies estudadas.

Diante da falta de informações sobre o tema na cana-de-açúcar e na cana-energia, hipotetizamos que 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, mas que o fornecimento do Si pode reverter esses efeitos especialmente no período que a planta recebeu mais Si correspondendo a fase (ii) em relação a outra fase (i) mas isso pode também depender da espécie. Portanto, sendo aceita essa hipótese permitirá pela primeira vez compreender melhor os mecanismos do Si para atenuar o déficit hídrico por um período relativamente longo após o transplântio e identificando inclusive se há ou não espécie mais beneficiada.

Para isso, realizou-se essa pesquisa objetivando avaliar os efeitos benéficos do Si aplicado via fertirrigação associado com a pulverização foliar na atenuação dos danos causados pelo déficit hídrico severo em período intermediário e longo após o transplântio, na manutenção da homeostase nutricional e no aumento da eficiência de uso do C, N e P em plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia.

## 2 Material e métodos

### 2.1 Material vegetal e condições de crescimento

Foram desenvolvidos quatro experimentos simultaneamente em casa de vegetação da UNESP Câmpus de Jaboticabal, no período de janeiro a setembro de 2019, utilizando plantas de duas espécies: *S. officinarum* L. (cana-de-açúcar - variedade RB 966928 – experimentos I e III) e *S. spontaneum* L. (cana-energia - variedade VX2 – experimentos II e IV). A variedade de cana-energia utilizada foi obtida da Vignis®, sendo classificada como tipo II pela produção de alto teor de fibra (>28%) e baixo teor de açúcar na forma de sacarose (<6%) (Matsuoka et al., 2014).

Os experimentos foram desenvolvidos cultivando inicialmente os brotos das duas espécies em vasos preenchidos com substrato inerte que receberam os tratamentos com Si durante a fase de formação das mudas; seguidamente, realizou-se o transplântio para vasos com amostras de Neossolo Quartzarênico que receberam os tratamentos com os regimes hídricos.

### 2.2 Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial 2 x 2, sendo constituído pelo fornecimento de Si: ausência da aplicação de Si (-Si) e presença de Si (+Si) aplicado via fertirrigação associado com a pulverização foliar exclusivamente na fase de produção de mudas (experimentos I e II); e também na fase de produção de mudas com complementação após o transplântio (experimentos III e IV), combinados com dois regimes hídricos no solo: 70% da capacidade de retenção de água (CRA) (regime hídrico adequado - controle) e 30% da CRA (déficit hídrico severo - DH) aplicados por período de 7 até 60 (experimentos II e II) e de 7 a 160 dias após o transplântio (experimentos III e IV). Em todos os experimentos, as parcelas foram dispostas em blocos casualizados, com 6 repetições nos experimentos I e II; e com 5 repetições nos experimentos III e IV.

Inicialmente, foram produzidas mudas pré-brotadas das duas espécies estudadas. Para tal, foi realizado o plantio dos mini-rebolos (5±0,5 cm de comprimento) em bandejas de produção de mudas preenchida com vermiculita fina.

Utilizou-se uma solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) com alteração na concentração de ferro para  $368 \mu\text{mol L}^{-1}$  na forma de Fe–EDDHA, conforme indicação de Cavalcante et al. (2016). Para evitar a salinização do substrato, a concentração da solução nutritiva durante a primeira semana de cultivo foi mantida a 25% de diluição e elevada para 50% da segunda semana até o fim da fase de formação das mudas. Para determinar o volume de solução a ser aplicado foi previamente realizado um teste de saturação, sendo o volume de 10 mL por célula suficiente para saturação do substrato evitando perda por lixiviação. O valor pH da solução foi ajustado para  $5,5 \pm 0,2$  com o uso de solução de ácido clorídrico ou hidróxido de sódio ambos a  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ .

A fonte de Si solúvel utilizada foi o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol ( $113,4 \text{ g L}^{-1}$  de Si,  $18,9 \text{ g L}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $100 \text{ mL L}^{-1}$  de sorbitol e pH 11,8) na concentração de  $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$ . Essa concentração de Si foi usada porque o elemento em solução começa a polimerizar com uma concentração de  $3 \text{ mmol L}^{-1}$  (Birchall, 1995). Foram realizadas 15 fertirrigações de Si com intervalos de 4 dias, a partir de 10 dias após a emergência plena dos brotos (DAE), aplicando 10 mL por muda via substrato (para induzir absorção radicular) e 1,47 mL por muda via pulverização foliar (para induzir absorção foliar). A quantidade de solução aplicada via foliar foi definido pela média do volume gasto em pulverizações em um número conhecido de mudas, objetivando o molhamento da superfície foliar com microgotas, mas sem induzir escorrimento. Em todas as pulverizações foliares de Si, a umidade relativa do ar foi superior a 60% e a temperatura, inferior a  $30^\circ\text{C}$ . O pH da solução fertirrigada foi ajustado para  $5,5 \pm 0,2$ . Foi realizado o equilíbrio da quantidade de potássio presente na fonte de Si ( $15,7 \text{ g L}^{-1}$  de K) nos tratamentos com ausência do elemento, utilizando uma solução de cloreto de potássio a  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  com aplicação via radicular e por pulverização foliar.

Aos 70 DAE, iniciou-se a segunda fase dos experimentos. Para tal, as mudas foram transplantadas para vasos de  $5,5 \text{ dm}^3$  (experimentos I e II) e  $20 \text{ dm}^3$  (experimentos III e IV) preenchidos com amostras de Neossolo Quartzarênico (Santos et al., 2018) coletado do horizonte Ap. Foi realizada uma análise química do solo para fins de fertilidade, de acordo com o método descrito por Raij et al. (2001), apresentando os seguintes resultados: pH ( $\text{CaCl}_2$ ): 4,3, matéria orgânica:  $9,0 \text{ g dm}^{-3}$ ,

P (res): 2,0 mg dm<sup>-3</sup>, B: <0,12 mg dm<sup>-3</sup>, Cu: 0,2 mg dm<sup>-3</sup>, Fe: 9,0 mg dm<sup>-3</sup>, Mn: 1,7 mg dm<sup>-3</sup>, Zn: 0,4 mg dm<sup>-3</sup>, Ca: 3,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, Mg: 1,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, K: 0,3 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, H+Al: 16,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, soma de bases (SB): 4,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, capacidade de troca de cátions (CTC): 20 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e saturação por bases (V: SBx100/CTC): 21,0%. O teor de Si foi de 1,0 mg dm<sup>-3</sup>, determinado usando cloreto de cálcio a 0,01 mol L<sup>-1</sup> como extrator conforme o método de Korndörfer et al. (2004).

Trinta dias antes do transplântio, foi realizada aplicação de calcário (poder relativo de neutralização total: 125%, CaO: 48%, MgO: 16%) no solo para elevar o V a 60%, sendo adequadamente misturado ao volume de solo. O solo foi mantido em 70% de CRA para induzir a reação do calcário. Após esse período, foi realizado a aplicação de fertilizante no solo aplicando o 150 mg dm<sup>-3</sup> de N, P e K nos vasos com 5,5 dm<sup>3</sup> de solo; e de 250 mg dm<sup>-3</sup> de N e K e 150 mg dm<sup>-3</sup> de P nos vasos com 20 dm<sup>3</sup> de solo. As fontes usadas foram o sulfato de amônio, superfosfato triplo e cloreto de potássio. O superfosfato triplo foi aplicado em dose única sendo incorporado ao volume de solo. O sulfato de amônio e o cloreto de potássio foram aplicados via fertirrigação em doses de 50 mg dm<sup>-3</sup> iniciando quatro dias após o transplântio com intervalos de 7 dias. Também foi realizada aplicação de 5 mg dm<sup>-3</sup> de Zn na forma de sulfato de zinco e 2 mg dm<sup>-3</sup> de B como ácido bórico via fertirrigação aplicados em dose única na primeira aplicação dos fertilizantes N e K.

No transplântio, as mudas tinham seis folhas completamente desenvolvidas e foi realizado o corte a 30 cm da bainha da primeira folha completamente desenvolvida, ou seja, cerca de um terço das folhas foram removidas, sendo uma prática comum em viveiros de mudas com o objetivo de diminuir a perda de vapor de água por transpiração no momento do transplântio para solo. Em seguida, as mudas foram transplantadas para os vasos preenchidos com solo e mantidas em 70% de CRA por sete dias e posteriormente, submetidas aos regimes de água no solo.

Nos experimentos III e IV foram realizadas as mesmas concentrações e épocas de aplicação do Si descritas anteriormente durante a formação das mudas e mais 5 fertirrigações e pulverizações foliares de Si com aplicação após o transplântio aos 20, 35, 50, 65 e 80 dias. A aplicação do Si via fertirrigação foi realizada simulando lâmina de 5 mm de solução silicatada, sendo aplicado 481 mL de solução via raízes por vaso

de 20 dm<sup>3</sup> considerando a área superficial de 962 cm<sup>2</sup>. A concentração de Si utilizada foi de 2,5 mmol L<sup>-1</sup>, correspondendo a 33,67 mg de Si por vaso, equivalente a 3,5 kg ha<sup>-1</sup> de Si por aplicação ou 17,5 kg ha<sup>-1</sup> de Si nas cinco aplicações realizadas. A pulverização foliar foi realizada simultaneamente as fertirrigações, usando pulverizador manual de modo a garantir o cobrimento da folha, sem que houvesse escorrimento. O pH da solução fertirrigada foi ajustado para 5,5±0,2. Foi realizado o equilíbrio da quantidade de potássio presente na fonte de Si nos tratamentos com ausência do elemento, utilizando uma solução de cloreto de potássio a 1,0 mol L<sup>-1</sup> com aplicação via radicular e por pulverização foliar.

Os regimes de água no solo foram determinados a partir dos valores de microporosidade obtidos pelo método da mesa de tensão com coluna de água de 60 cm. Para isso, amostras de solo não perturbadas foram coletadas usando um anel volumétrico (V: 98,125 cm<sup>3</sup>), as amostras foram saturadas por 24 h, depois colocadas na mesa de tensão por 72 h e a massa foi medida (a), então as amostras foram secas em estufa a 110°C por 24 h e a massa foi novamente medida (b). A microporosidade total (Mi): ((a-b)/V) encontrada foi equivalente a 100% da CRA (Embrapa, 1997). No entanto, a condição ideal da água foi de 70% desse valor, pois permite que 70% dos microporos sejam preenchidos com água disponível e os 30% restantes com ar, mantendo a troca gasosa das raízes (Boaretto et al., 2014). Assim, os regimes hídricos no solo foram: 70% de CRA como adequado (controle) e 30% de CRA como déficit hídrico severo (DH) para cana-de-açúcar conforme indicado por Teixeira et al. (2020a).

O manejo da irrigação foi realizado diariamente para que a umidade do solo, dentro de cada tratamento tivesse a mínima variação possível, ou seja, insignificante para alterar a resposta biológica da planta. Assim, a massa de solo utilizada para preencher cada vaso foi controlada com alto rigor, além disso, a massa dos vasos também foi definida para descontar da massa total. A partir disso, foi utilizado o método de reposição de massa, considerando as perdas de água por evaporação do solo e transpiração da planta, controlada diariamente a partir da pesagem dos vasos. Isso garantiu que as plantas fossem mantidas nos níveis de CRA propostos nos tratamentos, uma vez que os ajustes foram feitos vaso a vaso. A mesma frequência

de irrigação foi utilizada para ambas as espécies e para os tratamentos de irrigação, ou seja, todos foram pesados diariamente.

No momento da reposição da água, os vasos de 70% da CRA tinham aproximadamente 60% e os vasos de 30% da CRA tinham aproximadamente 25%. Justifica-se que a maior perda de água nos vasos 70% da CRA deve-se pela elevada taxa de transpiração por área foliar causada pelo maior crescimento das plantas. Além disso, as irrigações sempre foram feitas no mesmo horário do dia (às 17 h) porque foram realizados testes preliminares e a perda de água foi mais acentuada entre o período das 14 às 17 h, portanto, embora tenha havido variação, ela ocorreu apenas durante um período de 3 h por dia.

As plantas dos experimentos I e II foram cultivadas sob déficit hídrico severo por um período de 7 a 60 dias após o transplante (fase de perfilhamento), enquanto as dos experimentos III e IV foram até 7 a 160 dias (fase de formação inicial dos colmos). Após esse período as plantas foram coletadas e as análises foram realizadas conforme descrito a seguir:

## **2.3 Parâmetros avaliados**

### **2.3.1 Produção de massa seca**

As plantas foram separadas em folhas e colmos, posteriormente lavadas em água potável, solução detergente (0,1% v/v), solução de HCl (0,3% v/v) e água deionizada. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, Brazil) ( $65\pm 5^\circ\text{C}$ ), até atingir uma massa constante e obtido a massa seca de cada parte da planta.

### **2.3.2 Teor de Si**

Os teores de Si nas folhas e colmos foram obtidos pela extração do elemento de acordo com a metodologia descrita por Kraska e Breitenbeck (2010) e a leitura foi realizada por espectrofotômetro (B442, Micronal, Brazil) a 410 nm conforme indicado por Korndörfer et al. (2004).

### 2.3.3 Teores de C, N e P

Os teores de C e N nas folhas e colmos foram determinados por combustão seca a 1000°C usando um analisador elementar LECO Truspec CHNS, calibrado com um padrão de trigo LECO 502–278 (C = 45% e N = 2,68%). Os teores de P nas folhas e colmos foram determinados pela digestão das amostras utilizando-se uma mistura digestiva de ácido perclórico e nítrico (1:2), com leituras realizadas pelo método colorimétrico de antimônio de molibdênio em espectrofotômetro (B442, Micronal, Brazil) a 420 nm (Bataglia et al., 1983).

### 2.3.4 Relações estequiométricas

Determinou-se as relações estequiométricas C:Si, C:N, C:P e N:P a partir da relação entre os teores desses elementos em cada parte da planta avaliada.

### 2.3.5 Eficiências nutricionais

As eficiências do uso de C, N e P foram calculadas de acordo com Siddiqi e Glass (1981), expressa como o quociente da massa seca ao quadrado pelo acúmulo do respectivo nutriente. Para tanto, foi utilizado a seguinte equação:

$$\text{Eficiência de uso (g}^2\text{ g}^{-1}\text{)} = (\text{massa seca da planta inteira}^2) \div \text{acúmulo total do nutriente (g por planta)}$$

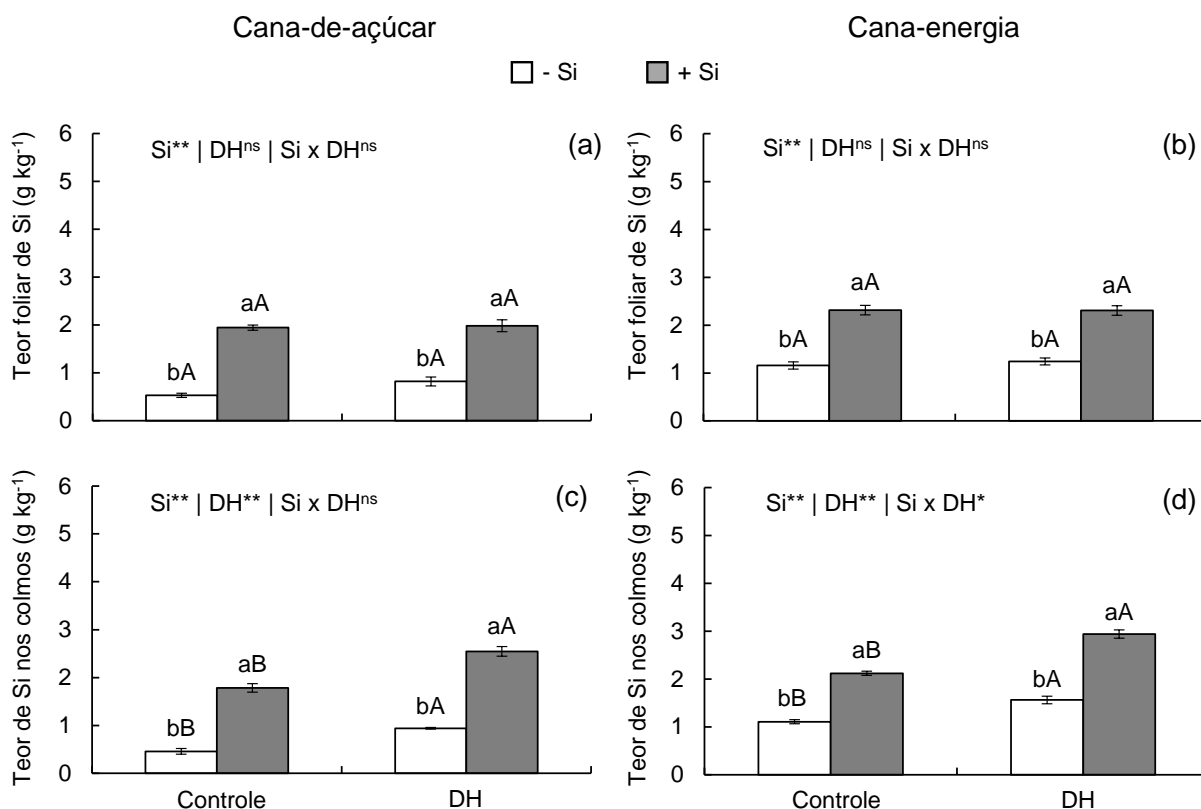
## 2.4 Análise estatística

Os experimentos foram analisados de forma independente. Os dados foram submetidos à análise de variância bidirecional pelo teste F ( $p < 0,05$ ) após atender às premissas de normalidade (teste W de Shapiro-Wilks) e homogeneidade de variâncias (teste de Bartlett).

A análise fatorial foi utilizada para testar os principais efeitos do suprimento de silício (Si) e do regime de água no solo (DH) e suas interações (Si × DH). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade por meio do software estatístico SAS® (Cary, NC, EUA).

### 3. Resultados

Os teores de Si das folhas e colmos aumentaram em plantas de ambas as espécies que receberam a aplicação do elemento exclusivamente na fase de produção de mudas (Figura 1a-d) e também quando houve complementação após o transplântio (Figura 2a-d), em relação a ausência do fornecimento do elemento.

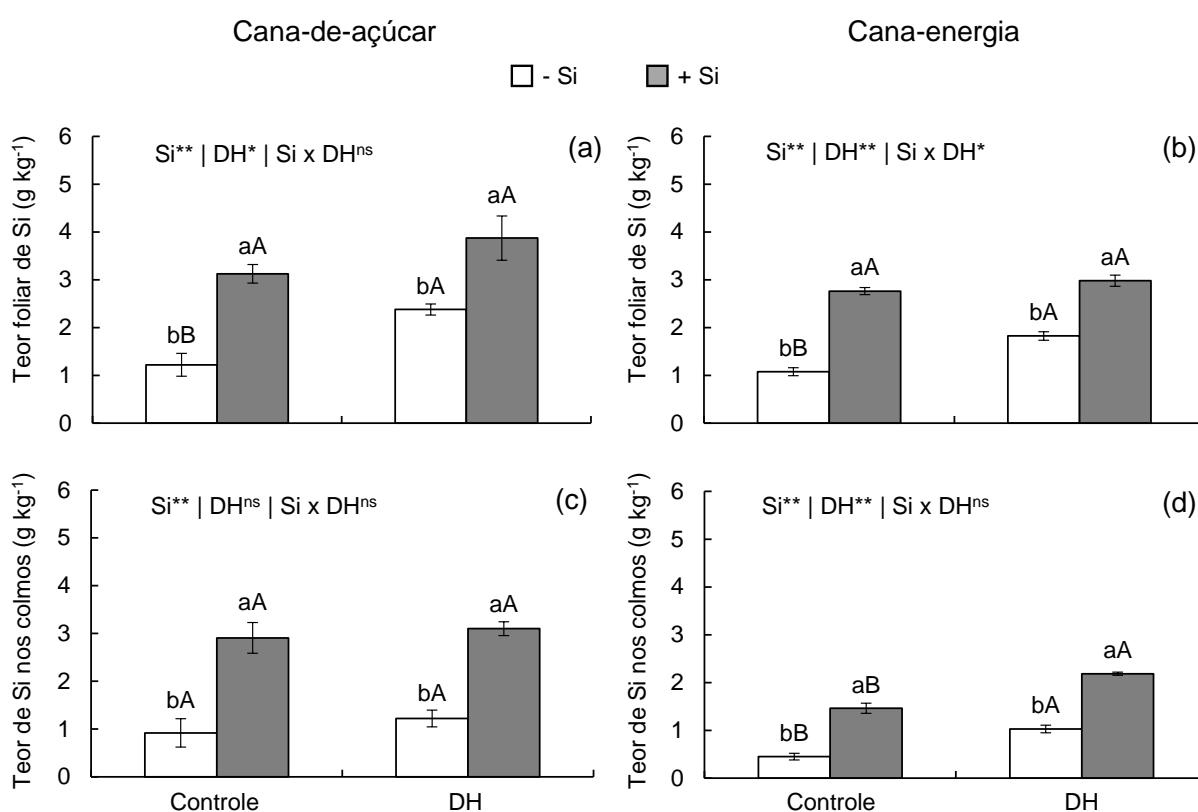


**Figura 1.** Teores de silício (Si) nas folhas e colmos de plantas de cana-de-açúcar (a, c) e de cana-energia (b, d) na ausência de aplicação de Si (-Si) e com Si aplicado via fertirrigação associado com a pulverização foliar (+Si) sob regime hídrico adequado (controle) e em déficit hídrico severo (DH) por período de 7 até 60 dias após o transplântio. \*\* e \*: significativo com  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente e <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico.  $n = 6$ . Si x DH: interação.

Na ausência da aplicação de Si, o regime de déficit hídrico severo até a fase de perfilhamento aumentou o teor de Si nos colmos de plantas da cana-de-açúcar e cana-energia (Figura 1c, d), comparando-se a plantas sob regime hídrico controle. Contudo, com o déficit hídrico estendendo até a fase de formação inicial dos colmos, observou-se maiores teores de Si foliar na cana-de-açúcar e cana-energia (Figura 2a,

b), bem como, o teor nos colmos da cana-energia (Figura 2d) em plantas sob déficit hídrico, em relação a cultivadas sob regime hídrico controle.

Com o fornecimento de Si apenas durante a fase de produção de mudas, as plantas de cana-energia apresentaram maiores teores do elemento benéfico nas folhas e colmos, em relação a cana-de-açúcar em ambos os regimes hídricos (Figura 1a-d). Contudo, quando houve complementação na aplicação de Si após o transplante, os teores observados na cana-de-açúcar foram maiores em relação a cana-energia, com o fornecimento de Si independente do regime hídrico (Figura 2a-d).



**Figura 2.** Teores de silício (Si) nas folhas e colmos de plantas de cana-de-açúcar (a, c) e de cana-energia (b, d) na ausência de aplicação de Si (-Si) e com Si aplicado via fertirrigação associado a pulverização foliar (+Si) sob regime hídrico adequado (controle) e em déficit hídrico severo (DH) por período de 7 até 160 dias após o transplante. \*\* e \*: significativo com  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente e <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico.  $n = 5$ . Si x DH: interação.

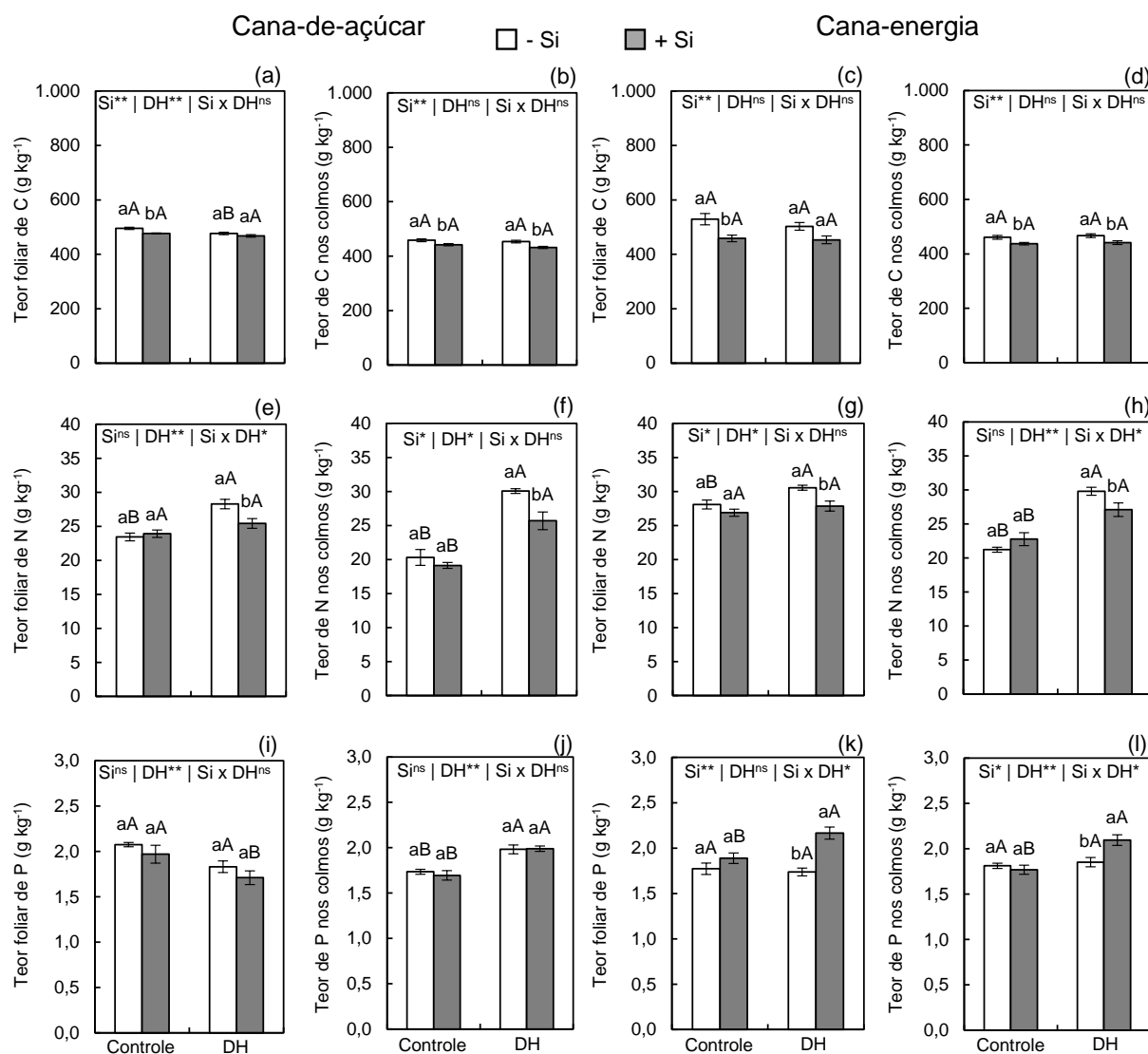
O cultivo das plantas sem aplicação de Si e sob déficit hídrico até a fase de perfilhamento causou diminuição no teor de C nas folhas de cana-de-açúcar, mas não alterou os teores em plantas de cana-energia, comparando-se com a condição hídrica controle (Figura 3a-d). Contudo, a imposição do déficit hídrico até a fase de formação inicial dos colmos induziu diminuição no teor de C nas folhas e colmos de plantas da cana-energia, mas não alterou esses teores na cana-de-açúcar, em comparação com plantas sob regime hídrico controle (Figura 4a-d).

A aplicação de Si apenas na fase de produção de mudas proporcionou diminuição nos teores de C nas folhas e colmos de plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia sob regime hídrico controle, em relação a ausência da aplicação do elemento (Figura 3a-d). Na condição de estresse, foi observado menor teor de C apenas nos colmos de ambas as espécies, comparando-se com -Si (Figura 3b, d). Com a complementação do fornecimento de Si após o transplântio também se observou menor teor de C nas folhas e nos colmos na cana-de-açúcar e cana-energia cultivada sob regime hídrico controle, em relação a -Si (Figura 4a-d). De maneira semelhante, essa diminuição também foi vista em plantas sob déficit hídrico nos teores de C dos colmos da cana-de-açúcar (Figura 4b) e nas folhas e colmos da cana-energia (Figura 4c, d).

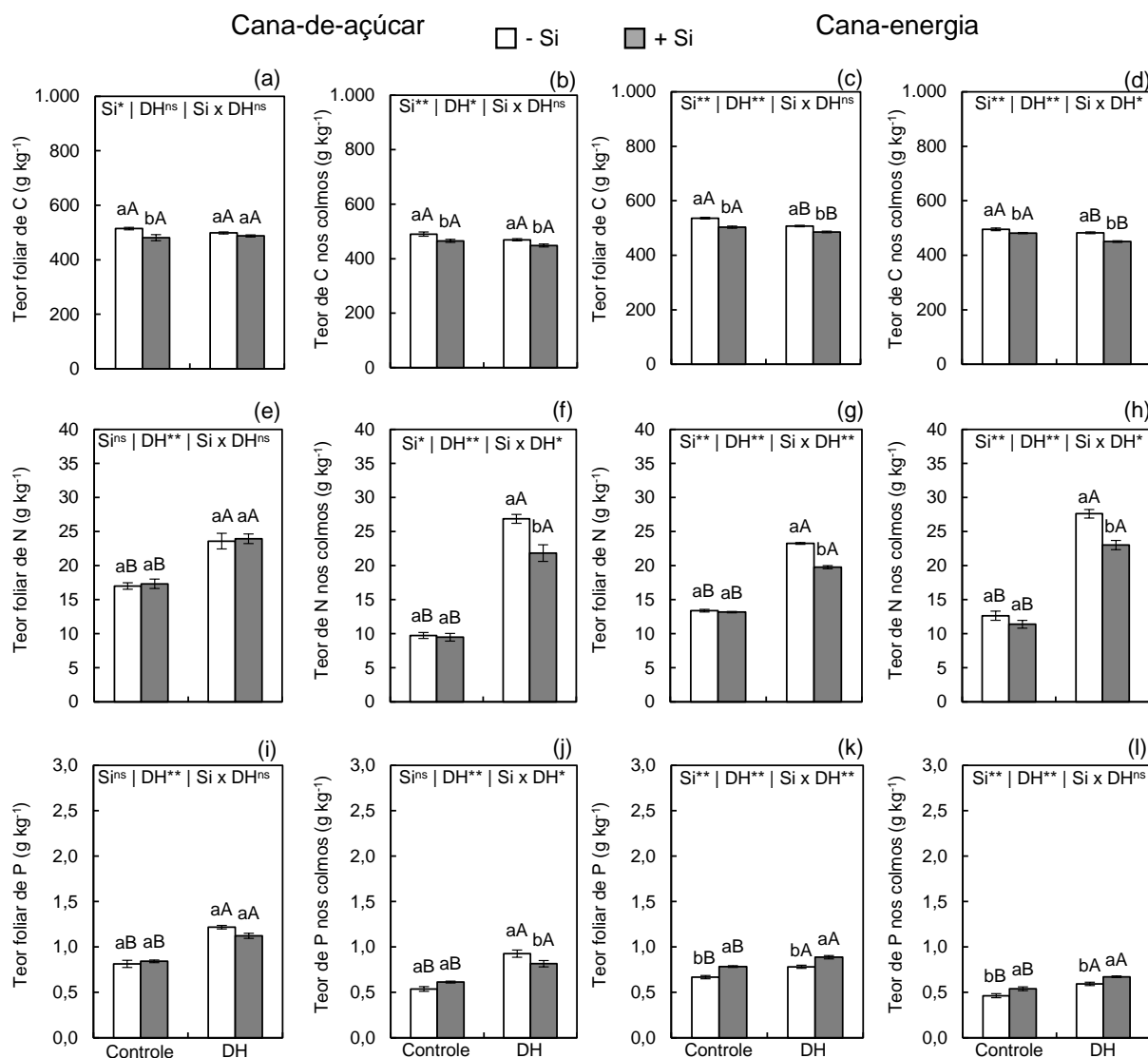
O teor de N foliar e nos colmos aumentou em plantas de ambas as espécies cultivadas na presença e ausência do fornecimento de Si sob regime de déficit hídrico severo até a fase de perfilhamento (Figura 3e-h) ou até a formação inicial dos colmos (Figura 4e-h), em comparação com o regime hídrico controle. Contudo, apesar do aumento induzido pelo déficit hídrico, com o fornecimento de Si apenas durante a fase de produção das mudas, os teores de N foram menores nas folhas e colmos de ambas as espécies (Figura 3e-h), em relação a plantas que não receberam aplicação do elemento. Aplicando-se Si complementar após o transplântio, apenas os teores de N nos colmos da cana-de-açúcar e nas folhas e colmos da cana-energia foram menores, em relação a -Si (Figura 4e, f).

A exposição das plantas a condição de déficit hídrico severo até a fase de perfilhamento na ausência da aplicação de Si causou aumento do teor de P apenas nos colmos da cana-de-açúcar (Figura 3i-l), comparando com plantas sob regime

hídrico controle. Mas com o cultivo das plantas sob déficit hídrico severo até a fase de perfilhamento, observou-se maiores teores de P nas folhas e colmos da cana-de-açúcar e cana-energia, independentemente da fertilização com Si (Figura 4i-l), comparando-se com plantas do regime hídrico controle.



**Figura 3.** Teores de carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P) nas folhas e colmos de plantas de cana-de-açúcar (a, b, e, f, i, j) e de cana-energia (c, d, g, h, k, l) na ausência de aplicação de Si (-Si) e com Si aplicado via fertirrigação associado com a pulverização foliar (+Si) sob regime hídrico adequado (controle) e em déficit hídrico severo (DH) por período de 7 até 60 dias após o transplante. \*\* e \*: significativo com  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente e <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico.  $n = 6$ . Si x DH: interação



**Figura 4.** Teores de carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P) nas folhas e colmos de plantas de cana-de-açúcar (a, b, e, f, i, j) e de cana-energia (c, d, g, h, k, l) na ausência de aplicação de Si (-Si) e com Si aplicado via fertirrigação associado a pulverização foliar (+Si) sob regime hídrico adequado (controle) e em déficit hídrico severo (DH) por período de 7 até 160 dias após o transplante. \*\* e \*: significativo com  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente e <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico.  $n = 5$ . Si x DH: interação.

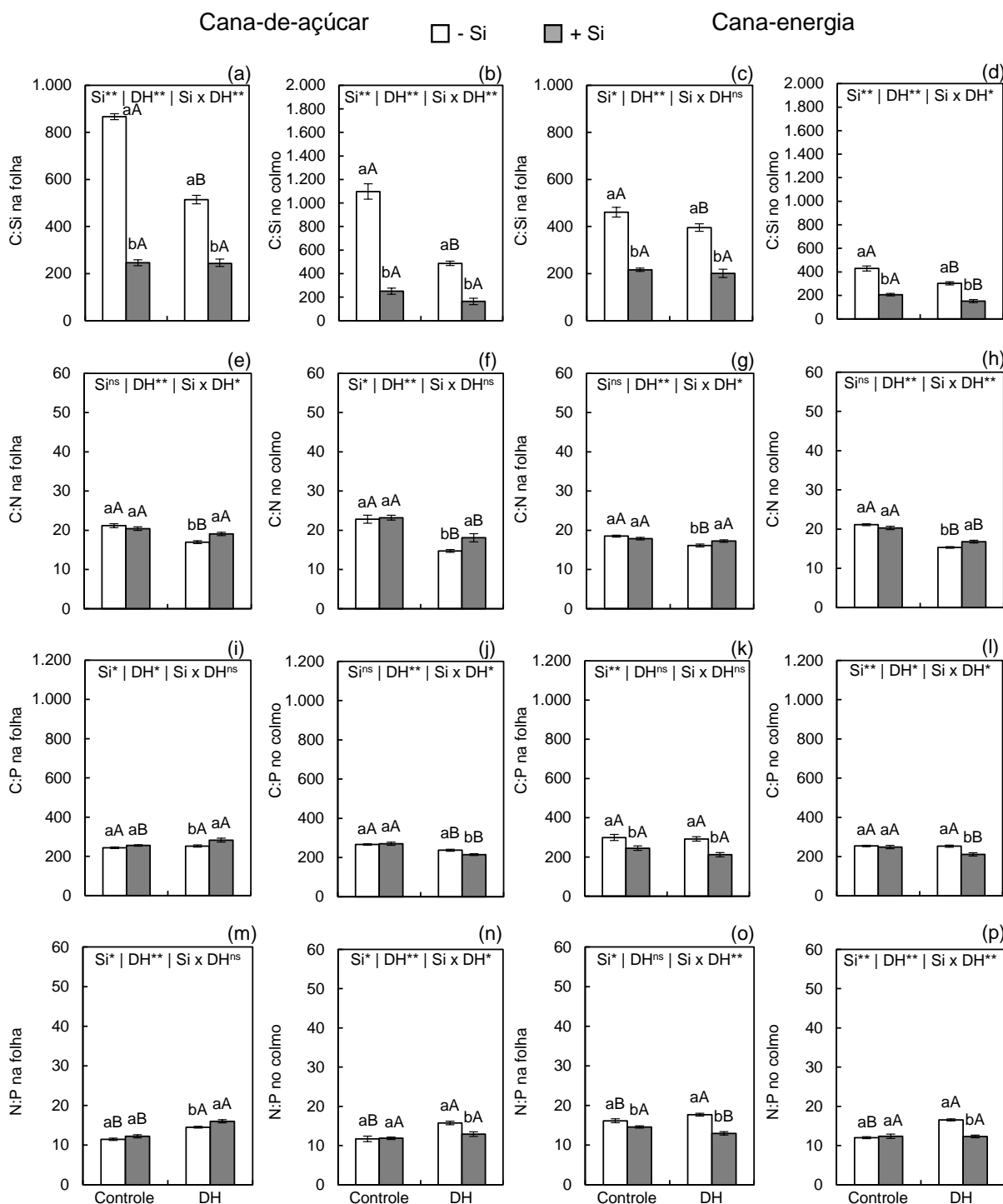
A aplicação de Si apenas na fase de formação de mudas intensificou o aumento dos teores de P nas folhas e colmos da cana-energia (Figura 3k, l), comparando-se com plantas sob -Si. Com a aplicação de Si complementar após o transplante, também houve aumento dos teores de P nas folhas e colmos da cana-energia nos

dois regimes hídricos do solo (Figura 4k, l), mas o teor de P nos colmos da cana-de-açúcar sob déficit hídrico diminuiu (Figura 4j), em relação a -Si.

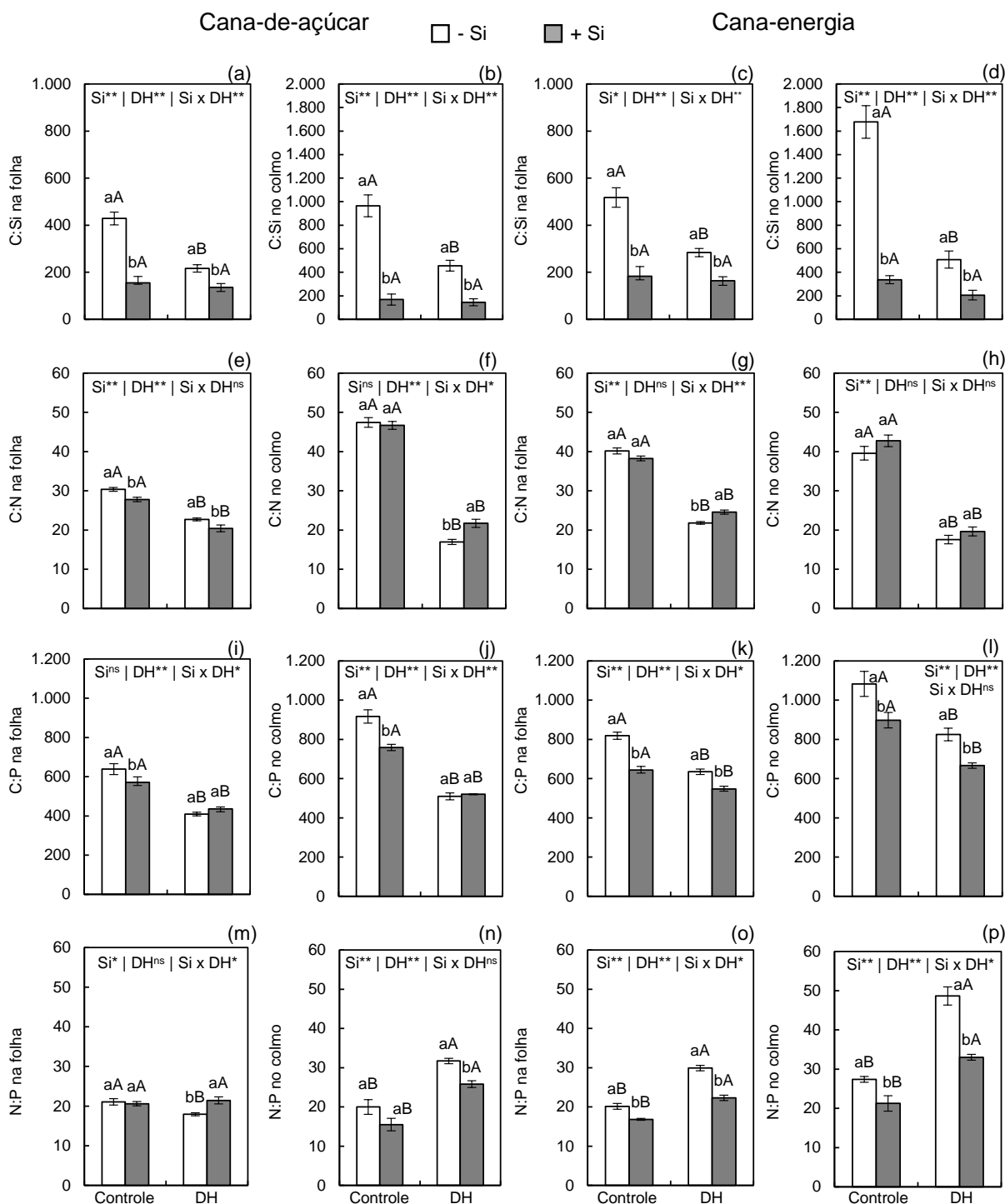
A relação C:Si nas folhas e colmos das plantas sem aplicação de Si foi diminuída quando estas foram submetidas ao déficit hídrico até a fase de perfilhamento (Figura 5a-d) ou até a formação inicial dos colmos (Figura 6a-d), comparando-se com plantas com suprimento hídrico adequado. A aplicação de Si apenas na fase de produção de mudas e com a complementação após o transplântio, diminuiu a relação C:Si nos colmos e folhas da cana-de-açúcar e da cana-de-açúcar sob regime hídrico controle e com déficit hídrico até a fase de perfilhamento (Figura 5a-d) ou até a formação inicial dos colmos (Figura 6a-d), em relação às plantas que não tiveram oferta de Si.

As relações C:N nas folhas e colmos na cana-de-açúcar e cana-energia e a relação C:P nos colmos da cana-de-açúcar diminuíram quando não foi aplicado Si e as plantas foram cultivadas sob regime de déficit hídrico até a fase de perfilhamento, comparando-se com plantas sob condição hídrica controle (Figura 5e-h). Em condições de déficit hídrico até a fase de formação inicial dos colmos, as relações C:N e C:P nas folhas e colmos foram diminuídas, independentemente da fertilização com Si na cana-de-açúcar (Figura 6e-h) e na cana-energia (Figura 6e-l), em comparação com plantas sob suficiência hídrica.

O fornecimento de Si apenas da fase de produção das mudas induziu aumento da relação C:N nas folhas e nos colmos de plantas de cana-de-açúcar e cana-energia sob déficit hídrico severo até a fase de perfilhamento, em comparação com ausência da aplicação do elemento (Figura 5e-h). No regime de déficit hídrico até a fase de formação inicial dos colmos, a fertilização com Si na fase de formação das mudas com complementação após o transplântio aumentou a relação C:N nos colmos da cana-de-açúcar (Figura 6f) e nas folhas da cana-energia (Figura 6g), mas diminuiu nas folhas da cana-de-açúcar (Figura 6a), em relação a -Si.



**Figura 5.** Relações C:Si, C:N, C:P, N:P nas folhas e colmos de plantas de cana-de-açúcar (a, b, e, f, i, j, m, n) e de cana-energia (c, d, g, h, k, l, o, p) na ausência da aplicação de Si (-Si) e com Si aplicado via fertirrigação associado com a pulverização foliar (+Si) sob regime hídrico adequado (controle) e em déficit hídrico severo (DH) por período de 7 até 60 dias após o transplante. \*\* e \*: significativo com  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente e <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico.  $n = 6$ . Si x DH: interação.



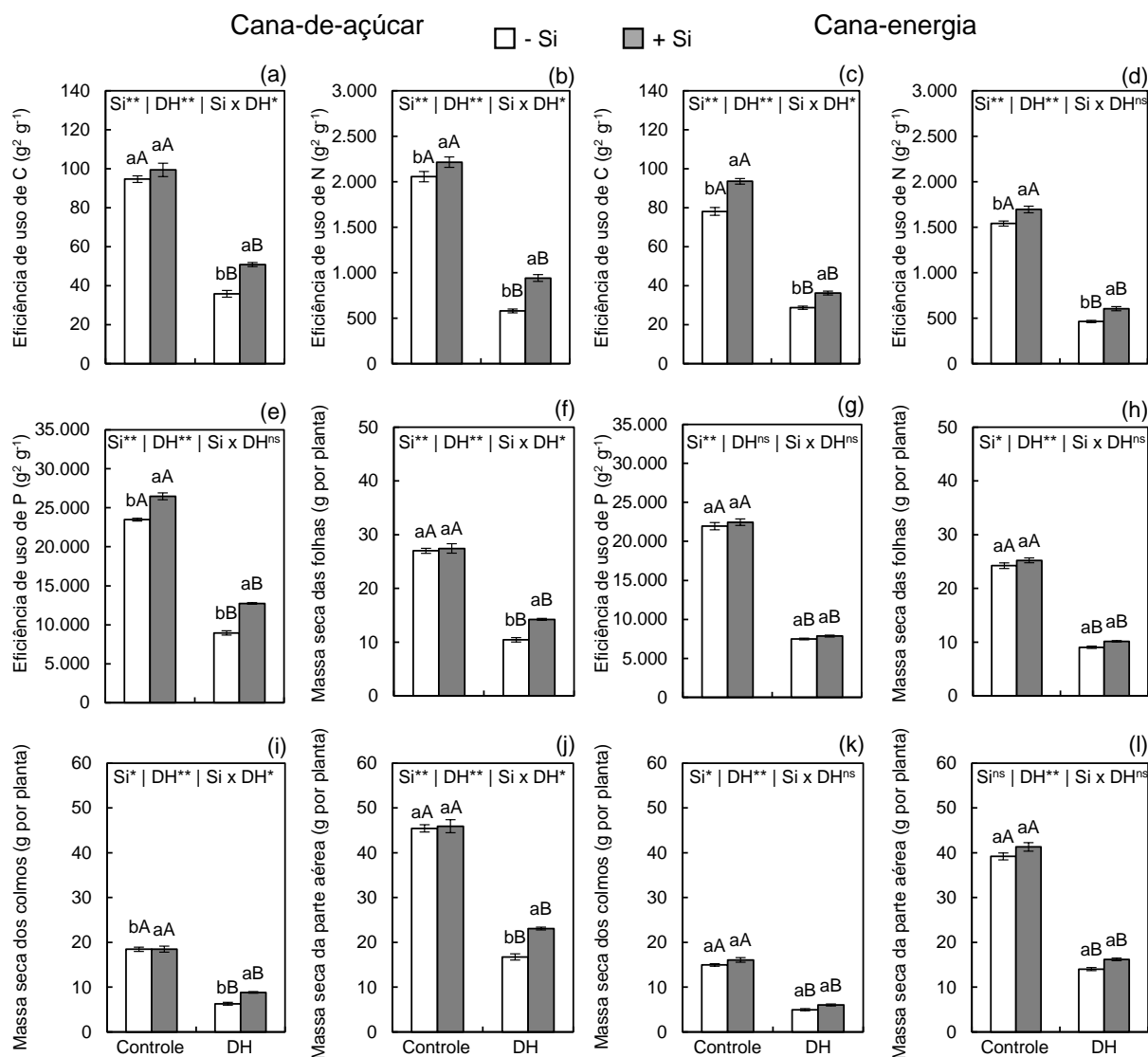
**Figura 6.** Relações C:Si, C:N, C:P, N:P nas folhas e colmos de plantas de cana-de-açúcar (a, b, e, f, i, j, m, n) e de cana-energia (c, d, g, h, k, l, o, p) na ausência de aplicação de Si (-Si) e com Si aplicado via fertirrigação associado a pulverização foliar (+Si) sob regime hídrico adequado (controle) e em déficit hídrico severo (DH) por período de 7 até 160 dias após o transplante. \*\* e \*: significativo com  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente e  $^{ns}$ : não significativo pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico.  $n = 5$ . Si x DH: interação.

A aplicação de Si apenas na fase de produção de mudas aumentou a relação C:P nas folhas da cana-de-açúcar (Figura 5i) e diminuiu nos colmos da cana-de-açúcar (Figura 5j) e nas folhas e colmos da cana-energia (Figura 5k, l) em plantas sob déficit hídrico severo até a fase de perfilhamento, comparando-se com plantas que não foram submetidas a estresse. Realizando-se uma complementação do fornecimento de Si após o transplântio, os efeitos na relação C:P estenderam-se até a fase de formação inicial dos colmos, havendo diminuição nas folhas e colmos, mas apenas da cana-energia sob déficit hídrico, em relação a -Si (Figura 6i-l).

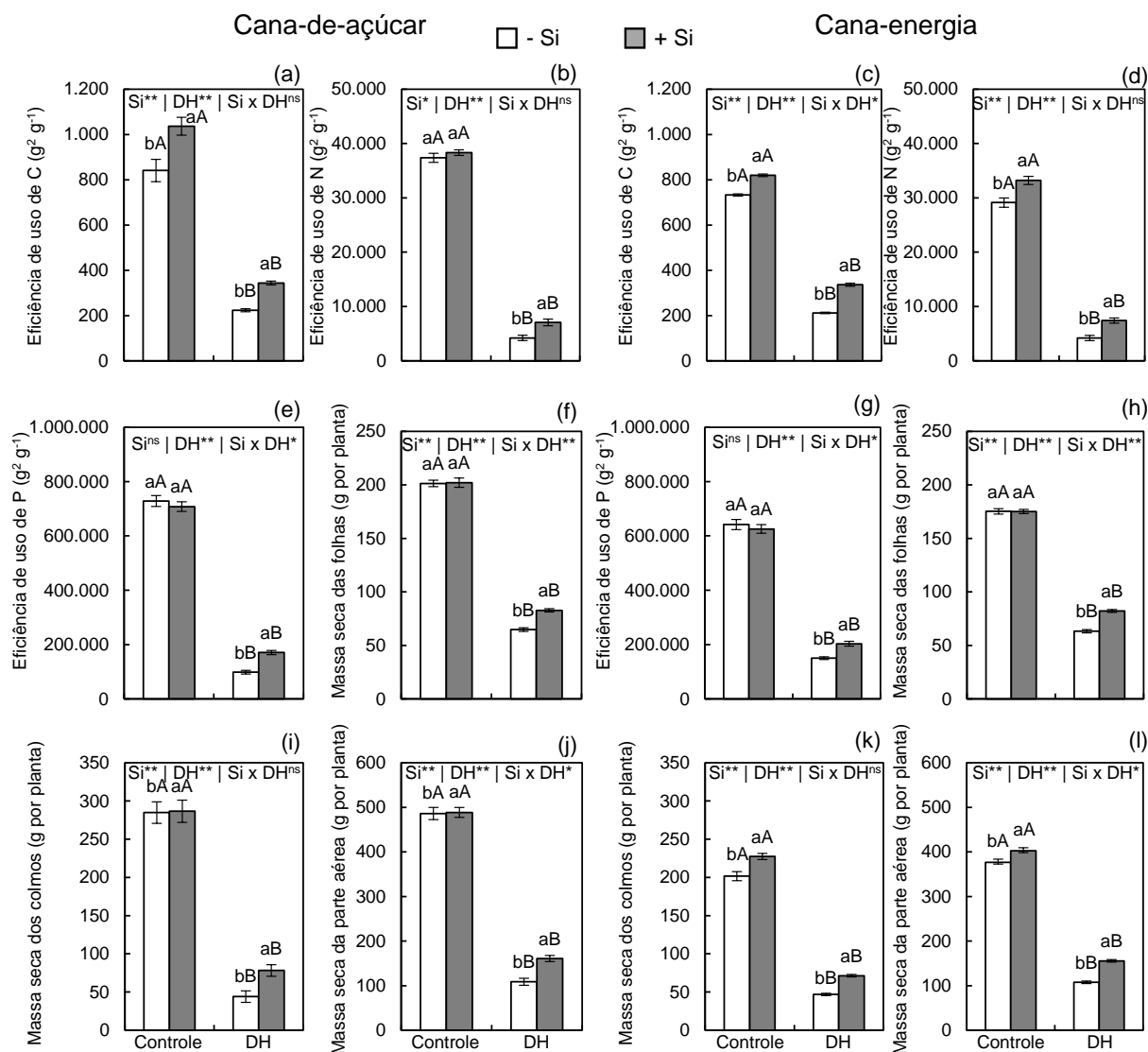
As relações N:P nas folhas e colmos da cana-de-açúcar e da cana-energia aumentaram com o regime de déficit hídrico até a fase de perfilhamento apenas em plantas que não receberam Si (Figura 5m-p). Mas no regime de déficit hídrico até a fase de formação inicial dos colmos houve aumento da relação N:P nas duas condições de fornecimento de Si, exceto nas folhas da cana-de-açúcar (Figura 6m-p), em comparação com o regime hídrico adequado. Entretanto, com o fornecimento de Si tanto aplicado exclusivamente na fase de produção de mudas como com a complementação após o transplântio, a relação N:P foi menor nos colmos da cana-de-açúcar e nas folhas e colmos da cana-energia e maior nas folhas da cana-de-açúcar, cultivadas sob déficit hídrico, em relação a -Si (Figuras 5 e 6m-p).

As eficiências de uso de C, N e P foram diminuídas nas plantas submetidas ao déficit hídrico em ambos os períodos de duração do déficit hídrico, em comparação às plantas com suficiência hídrica nas duas espécies (Figuras 7 e 8a-g). Porém, a aplicação de Si reverteu parcialmente as perdas nas eficiências desses nutrientes, com aumento das eficiências de uso de C e N em plantas de cana-de-açúcar e cana-energia cultivadas sob regime hídrico até a fase de perfilhamento (Figura 7a-d) ou até a formação inicial dos colmos (Figura 8a-d), em relação a plantas que não receberam aplicação do elemento.

A eficiência de uso de P aumentou apenas em plantas de cana-de-açúcar sob déficit hídrico até a fase de perfilhamento e em ambas as espécies sob o déficit hídrico até a fase de formação inicial dos colmos, em relação a plantas cultivadas na ausência da aplicação de Si e no mesmo regime hídrico (Figuras 7 e 8e, g).



**Figura 7.** Eficiência de uso de carbono (C), nitrogênio (N), e fósforo (P), massa seca das folhas, dos colmos e da parte aérea de plantas de cana-de-açúcar (a, b, e, f, i, j) e de cana-energia (c, d, g, h, k, l) na ausência de aplicação de Si (-Si) e com Si aplicado via fertirrigação associado com a pulverização foliar (+Si) sob regime hídrico adequado (controle) e em déficit hídrico severo (DH) por período de 7 até 60 dias após o transplante. \*\* e \*: significativo com  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente e <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico.  $n = 6$ . Si x DH: interação.



**Figura 8.** Eficiência de uso de carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P), massa seca das folhas, dos colmos e da parte aérea de plantas de cana-de-açúcar (a, b, e, f, i, j) e da cana-energia (c, d, g, h, k, l) na ausência de aplicação de Si (-Si) e com Si aplicado via fertirrigação associado a pulverização foliar (+Si) sob regime hídrico adequado (controle) e em déficit hídrico severo (DH) por período de 7 até 160 dias após o transplante. \*\* e \*: significativo com  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente e <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico.  $n = 5$ . Si x DH: interação.

As mudanças nas relações e eficiências nutricionais resultaram em efeitos na produção de massa seca. A massa seca das folhas (Figuras 7 e 8f, h), dos colmos (Figuras 7 e 8i, k) e da parte aérea (Figuras 7 e 8j, l) foram diminuídas com o cultivo das plantas sob regime de déficit hídrico severo até a fase de perfilhamento e

formação inicial dos colmos em ambas as espécies, independente da fertilização com Si.

Contudo, o fornecimento de Si diminuiu parcialmente as perdas associadas a produção de massa seca. A aplicação do elemento apenas durante a formação de mudas, proporcionou efeitos na diminuição das perdas na massa seca apenas na cana-de-açúcar sob déficit hídrico até a fase de perfilhamento (Figura 7f-l), com 37%, 40% e 38% maior massa seca das folhas, colmos e parte aérea, respectivamente (Figura 7f, i, j), em relação a -Si. No entanto, quando as plantas também foram enriquecidas com Si com aplicações complementares após o transplântio, observou-se aumento de 28%, 78% e 48% na cana-de-açúcar, e de 30%, 52% e 45% na cana-energia, para a massa seca das folhas, colmos e parte aérea, respectivamente, em plantas sob déficit hídrico até a fase de formação inicial dos colmos, em relação à ausência da aplicação de Si (Figura 8f-l).

#### 4 Discussão

O fornecimento de Si interfere na relação estequiométrica Si:C:N:P, aumentando a eficiência de uso de C, N e P com reflexos na produção de massa seca de plantas de cana-de-açúcar e cana-energia cultivadas sob déficit hídrico severo. Tais efeitos são influenciados pela época em que as aplicações são realizadas e pela condição de déficit hídrico, podendo ser obtidos com o fornecimento do Si exclusivamente na fase de formação das mudas em plantas sob déficit hídrico severo durante 7 a 60 dias após o transplântio e se estendem por período de 7 a 160 dias quando há uma complementação do Si com fertirrigações e pulverização foliar após o transplântio. Além disso, esses efeitos também variam com a espécie, sendo mais evidentes na cana-de-açúcar, em relação a cana-energia.

O benefício do Si nas plantas depende da capacidade de absorção do elemento pela cultura e das condições de cultivo ou de épocas de aplicação. Plantas cultivadas em solos com baixo teor de Si como o utilizado nesta pesquisa (Neossolo Quartzarênico) ( $Si=1,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ) são mais afetadas (Schaller et al., 2020), fato evidenciado pelo baixo teor deste elemento nas folhas e colmos das plantas que não

receberam a fertilização do elemento, com ou sem déficit hídrico severo. Plantas da família Poaceae reconhecidamente absorvem mais Si porque possuem proteínas nas membranas dos tecidos radiculares que são especializadas na absorção e transporte ativo do elemento (Mitani-Ueno e Ma, 2021). Apesar de não haver relatos anteriores sobre a capacidade da cana-energia em absorver Si, os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciam que aumento do teor do Si nas folhas e colmos foi semelhante ao obtido em plantas de cana-de-açúcar, indicando pela primeira vez que a cana-energia também pode ser classificada como acumuladora de Si.

A alta absorção de Si também se deve a forma utilizada para aplicação do elemento, sendo demonstrado que a fertirrigação associada com a pulverização foliar é eficiente em proporcionar aumento relevante nos teores de Si nas folhas e colmos de ambas as espécies. Tal efeito pode ser atribuído à qualidade da solução aplicada, que teve possivelmente baixas taxas de polimerização pela concentração adequada de Si utilizada de  $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$ , mantendo o elemento na forma monomérica ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) (Birchall, 1995). Além disso, essa forma de aplicação de Si permitiu uso de fonte solúvel estabilizada com sorbitol, um poliol que contribui para manter as formas monoméricas do Si formando complexos orgânicos (Kubicki e Heaney, 2003) e diminui o ponto de deliquescência da gota na superfície foliar (Babiker e Duncan, 1974) retardando a sua secagem e contribuindo para absorção do elemento pela superfície foliar, principalmente durante a fase de penetração da cutícula (Fernández e Brown, 2013). Outro aspecto importante usado para manter a forma monomérica de Si foi a acidificação no momento da aplicação, diminuindo o valor do pH da solução ( $5,5 \pm 0,2$ ). Em soluções ácidas contendo Si desloca-se a reação para direita ( $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-} \rightarrow \text{H}_3\text{SiO}_4^- \rightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$ ) e predomina espécies monoméricas do elemento (Kudryavtsev e Figovsky, 2016). Esses fatores somados melhoraram a qualidade da solução aplicada nas plantas.

O manejo adequado da solução do Si fornecida a planta favoreceu a sua absorção pelos órgãos folhas e raízes, aumentando consideravelmente os teores de Si nas plantas de ambas as espécies (Figuras 1 e 2). A aplicação do elemento exclusivamente na fase de formação de mudas aumentou o teor de Si nas folhas e nos colmos de ambas as espécies, comparando-se com plantas que não receberam o elemento. Contudo, havendo uma complementação com fertirrigações do elemento

após o transplântio, o efeito no aumento dos teores nas folhas e colmos foi ainda mais expressivo, sobretudo, em plantas da cana-de-açúcar. Assim, as duas formas de fornecimento podem ser consideradas para a adequada nutrição das plantas com Si, pois a fertirrigação associada com a pulverização foliar já é uma técnica utilizada em viveiros comerciais de produção de mudas de cana-de-açúcar para aplicação de nutrientes (Landell et al., 2012). A complementação após o transplântio também possui aplicabilidade pois pode ser realizada durante as irrigações localizadas que são comuns após o transplântio das mudas no campo devido baixa precipitação pluvial na época de plantio da cultura (ANA, 2021). Além disso, podem ser utilizadas em áreas de cultivo de cana-de-açúcar irrigada presente em muitas regiões de cultivo no mundo como na Índia (Dingre et al., 2021), na China (He et al., 2021) e outros países.

Mudanças nos teores foliares (Figuras 3 e 4) e nas razões estequiométricas C:N:P (Figuras 5 e 6) mediados pelo Si em plantas sob déficit hídrico nas duas espécies também já foram relatadas em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar, mas com déficit apenas durante 30 dias após o transplântio e com o fornecimento de Si apenas via radicular (Teixeira et al., 2020b). No entanto, a presente pesquisa é o primeiro estudo que descreve a ocorrência desses efeitos benéficos promovidos pelo Si aplicado via fertirrigação e via foliar em cana-de-açúcar e em cana-energia sob déficit hídrico severo em período longo de até cinco meses, incluindo a fase de perfilhamento e na formação inicial dos colmos.

A alta absorção de Si no tecido vegetal diminuiu os teores de C das folhas e colmos em plantas de ambas as espécies cultivadas sob regime hídrico controle e em déficit hídrico severo até a fase de perfilhamento e até a formação inicial dos colmos, exceto nas folhas da cana-de-açúcar sob déficit hídrico até 60 e 160 dias após o transplântio e nas folhas da cana-energia sob déficit hídrico até 60 dias. A incorporação de Si nos tecidos vegetais pode substituir parcialmente o C nos compostos orgânicos da parede celular (Neu et al., 2017), pois o Si é imobilizado nas paredes celulares na forma de fitólitos, que são materiais estruturais constituídos de uma combinação de biomoléculas (Schoelynck et al., 2010). Essa substituição possui interesse biológico porque o custo de energia (NADPH e ATP) para incorporação de Si em compostos estruturais é 50 vezes menor do que em compostos orgânicos,

devido à sua alta permeabilidade intrínseca nas bicamadas lipídicas (Raven, 1983). Assim, sugere-se que a demanda de compostos orgânicos estruturais, como a lignina e a celulose, é diminuída quando as plantas acumulam Si, indicando uma vantagem competitiva induzida, pois as plantas gastam menos energia com formação desses compostos metabólicos de alto custo (Schoelynck et al., 2010; Schaller et al., 2012) e podem direcionar energia para otimização do metabolismo de defesa ao estresse causado pela deficiência hídrica.

A menor concentração de lignina pode indicar um efeito benéfico do Si no aumento da qualidade da biomassa lignocelulósica para a produção de bioenergia, pois ela constitui uma barreira física para a ação da celulase no processo de sacarificação enzimática (Murozuka et al., 2014). O declínio das concentrações de C no tecido foliar induzido pelo Si também foi relatado em plantas de trigo (Neu et al., 2017) e *Phragmites australis* (Schaller et al., 2012) sem déficit hídrico, e em plantas de sorgo cultivadas sob estresse por salinidade (Hurtado et al., 2020). Diante dos resultados apresentados nesta pesquisa fica evidente que o menor teor de C induzido pelo Si também ocorre nas folhas e nos colmos de plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia em regime hídrico adequado e em déficit hídrico severo até a fase de perfilhamento e na formação inicial dos colmos.

O déficit hídrico severo imposto às plantas de cana-de-açúcar e cana-energia por período de até 60 e 160 dias após o transplante induziu aumento do teor de N nas folhas e colmos, sobretudo, em plantas que não receberam aplicação de Si. O maior teor de N sugere que o cultivo das plantas sob déficit hídrico por períodos intermediário e longo induziu aumento no conteúdo de compostos osmoprotetores que contêm N, como a prolina. A prolina é um aminoácido que atua como soluto compatível no ajuste osmótico celular para manter o status hídrico dos tecidos em diversas situações de desidratação induzidas pela seca (Szabados e Saviouré, 2010). Resultados diferentes foram obtidos em *Stylosanthes capitata* Vogel (Viciedo et al., 2021) e *Panicum maximum* Jacq (Viciedo et al., 2019) cultivados sob déficit hídrico induzido pela ausência total da irrigação por período de 30 dias. Assim, os resultados dessa pesquisa indicam que quando as plantas são cultivadas com o fornecimento contínuo de menor quantidade de água (30% de CRA) por períodos intermediário (de 7 até 60 dias após o transplante) e longo (de 7 até 160 dias após o transplante), a

absorção de N não é limitada e as plantas podem adquirir mecanismos de ajuste osmótico como estratégia de tolerância à seca.

Contudo, a aplicação de Si diminuiu os teores de N nas folhas e colmos da cana-de-açúcar e da cana-energia cultivadas sob déficit hídrico severo até a fase de perfilhamento e formação inicial de colmos, exceto nas folhas de cana-de-açúcar sob déficit hídrico no período de até 160 dias após o transplântio. A diminuição dos teores de N em plantas que receberam aplicação de Si sugere que o elemento tenha exercido efeito benéfico no equilíbrio do status hídrico das plantas, limitando a perda de água e mantendo o ajuste osmótico, sendo desnecessário o acúmulo de compostos contendo N-solúvel. A manutenção do status hídrico tem sido indicado em plantas que absorvem altas quantidades de Si, devido a deposição de sílica associada à celulose na epiderme foliar e abaixo da cutícula (Mitani-Ueno e Ma, 2021) que atua como uma barreira à perda de água e diminui a transpiração. O fornecimento de Si apenas via raízes em plantas de trigo sem déficit hídrico também induziu declínio nos teores de N (Murozuka et al., 2014).

O cultivo de plantas sem aplicação de Si e sob déficit hídrico severo até a fase de perfilhamento causou aumento do teor de P apenas nos colmos da cana-de-açúcar, mas aumentou os teores de P nas folhas e colmos de ambas as espécies quando foram cultivadas sob déficit hídrico até a fase de formação inicial dos colmos. O aumento dos teores de P pode ser justificado pela diminuição de processos biológicos de alto custo energético como a síntese de proteínas, que possivelmente tenha diminuído dado acúmulo de N em formas solúveis como foi sugerido para o aumento da prolina. A suspensão do fornecimento de água em plantas de *P. maximum* Jacq (Viciedo et al., 2019) e de *S. capitata* Vogel (Viciedo et al., 2021) por um período de 30 dias impediu a absorção de P com decréscimo nos teores foliares. Portanto, os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram que o déficit hídrico induzido pelo fornecimento de menores quantidades de água (30% da CRA) aplicadas diariamente por um período de 7 até 60 e 160 dias após o transplântio também não limitam a absorção de P por plantas de cana-de-açúcar e cana-energia.

O efeito da aplicação de Si aumentou os teores de P em plantas da cana-energia no regime de déficit hídrico até a fase de perfilhamento e formação inicial dos

colmos, o que pode ser explicado pelo alto estoque de P inorgânico no vacúolo celular (Neu et al., 2017). Isso também foi relatado para plantas de cana-de-açúcar cultivadas sob déficit hídrico com aplicação de Si via radicular (Teixeira et al., 2020b) e em plantas de arroz (Ma e Takahashi, 1990) e cana-de-açúcar (Frazão et al., 2020) cultivadas sem restrição hídrica. Mas na cana-de-açúcar o fornecimento de Si causou diminuição no teor de P nos colmos sob regime de déficit hídrico até a fase de formação inicial dos colmos, indicando que o suprimento de Si e o nível de estresse interfere no metabolismo do P, com consequentes efeitos na estequiometria dos nutrientes e na eficiência de uso.

As modificações nos teores dos nutrientes interferiram em suas proporções nas folhas e colmos de ambas as espécies. As relações estequiométricas elementares envolve a homeostase dos nutrientes (Elser e Hamilton, 2007) e são especialmente importantes porque podem afetar os processos de absorção e uso de nutrientes e, assim, refletir em desequilíbrio nutricional e, conseqüentemente, no crescimento das plantas e na produção de massa seca (Xie et al., 2020). Além disso, essas modificações estequiométricas podem interferir nas interações ecológicas, pois esses nutrientes estão fortemente relacionados ao funcionamento bioquímico e fisiológico das plantas (Viciado et al., 2019).

A condição de déficit hídrico severo e sem aplicação de Si promoveu diminuição da relação C:Si nas folhas e nos colmos de plantas da cana-de-açúcar e da cana-energia sob déficit hídrico até a fase de perfilhamento e até a fase de formação inicial dos colmos. Plantas que receberam aplicação de Si não demonstraram diferença em relação ao regime hídrico, apresentando baixas relações C:Si nas folhas e colmos de ambas as espécies. A menor relação C:Si ocorreu pela diminuição do teor de C em relação ao aumento do teor de Si.

A relação C:N nas folhas e colmos da cana-de-açúcar e da cana-energia diminuíram em plantas cultivadas sem a aplicação de Si e com o déficit hídrico até a fase de perfilhamento e formação inicial dos colmos. A diminuição da relação C:N deve-se principalmente ao aumento dos teores de N observados em plantas com deficiência hídrica por ambos os períodos de duração. Contudo, a aplicação de Si na fase de formação de mudas proporcionou efeito benéfico que aumentou a relação C:N

nas folhas e colmos da cana-de-açúcar e da cana-energia mesmo sob deficiência hídrica severa até a fase de perfilhamento, sendo inclusive semelhante à de plantas não estressadas nas folhas das duas espécies. Na condição de déficit hídrico por período mais prolongado, até a fase de formação inicial dos colmos, houve aumento da relação C:N apenas nas folhas da cana-energia e nos colmos da cana-de-açúcar. Isso sugere que o efeito do Si na relação C:N varia com a duração do déficit hídrico, com o órgão e a espécie avaliada.

O efeito decrescente de Si na concentração de C, associado ao aumento na concentração de P em plantas de cana-energia cultivadas sob os dois períodos de duração do déficit hídrico, diminuiu a razão C:P nas folhas e nos colmos. No entanto, na cana-de-açúcar a relação C:P não seguiu o mesmo padrão, diminuindo apenas nos colmos em plantas cultivadas sob regime de déficit hídrico até a fase de perfilhamento. As menores relações C:P em folhas e em colmos indicam que o Si contribui para manter o equilíbrio entre o C e P, mesmo em plantas com deficiência hídrica. As plantas sob estresse podem ajustar suas demandas de nutrientes como estratégia para promover nova homeostase estequiométrica e equilibrar seu metabolismo (Prado e Silva, 2017). Então pode-se inferir que o aumento da absorção de Si, principalmente em plantas sob estresse, contribui para manter a homeostase e equilibrar as razões de nutrientes no tecido das folhas e dos colmos, aumentando a quantidade de componentes estruturais ricos em C com função metabólica em detrimento da função estrutural.

Plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia sob déficit hídrico severo e sem aplicação de Si tiveram menor eficiência de uso de C, o que dificultou a produção de biomassa. A redistribuição de nutrientes em plantas sob déficit hídrico diminuiu, prejudicando a eficiência de uso desse nutriente e dos demais (Brouder e Volenec, 2008). Por sua vez, o Si aplicado via fertirrigação e foliar exclusivamente na fase de formação das mudas, bem como, com a complementação após o transplante aumentou a eficiência de uso de C nas plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia sob déficit hídrico severo. Isso pode ser atribuído a maior incorporação de Si nos tecidos vegetais, com seu uso mais na fotossíntese do que em compostos estruturais (Schaller et al., 2012), já que C é substituído por Si (Raven, 1983).

As eficiências de uso de N e P também foram diminuídas em plantas de cana-de-açúcar e cana-energia que não receberam a aplicação de Si no cultivo sob regime de déficit hídrico até a fase de perfilhamento ou até a formação inicial dos colmos. Contudo, a otimização do metabolismo de C induzido por Si melhorou a produção de esqueletos C e o metabolismo de nutrientes estruturais (por exemplo, N e P), diminuindo parcialmente as perdas causadas pela condição de déficit hídrico. O N e P constituem compostos orgânicos vitais para a planta, pois estão fortemente associados aos processos bioquímicos e fisiológicos vegetais (Prado, 2021).

A melhoria da eficiência do uso de N pelo fornecimento de Si pode ser resultado de mudanças no metabolismo primário, estimulando a translocação de aminoácidos da fonte para os tecidos absorvedores (Detmann et al., 2013). O fornecimento de Si também pode estimular a taxa fotossintética, melhorando a atividade da anidrase carbônica, bem como, aumentando a condutividade do mesofilo e o fluxo de CO<sub>2</sub> dos espaços aéreos intercelulares do mesofilo para os locais de fixação no estroma dos cloroplastos das células da bainha do feixe vascular (Detmann et al., 2013). Além disso, o aumento da eficiência de uso de C e N indicam diminuição no custo de energia na incorporação de Si por substituição de compostos orgânicos, causando reflexos no aumento da eficiência de uso de P. Esse aumento da eficiência de uso de N e P pelo efeito do Si já foi relatado no trigo de inverno sem estresse (Neu et al., 2017) e em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob déficit hídrico por até 30 dias (Teixeira et al., 2020b).

Os efeitos benéficos do Si na mitigação dos danos causados pelo déficit hídrico em cana-de-açúcar por ajuste de parâmetros fisiológicos e bioquímicos foram descritos anteriormente (Bezerra et al., 2019; Teixeira et al., 2020a; Teixeira et al., 2021; Verma et al., 2021). No entanto, esses autores não relacionaram os ganhos na produção de massa das plantas às mudanças na estequiometria Si:C:N:P. A indicação do efeito do Si no aumento da homeostase nutricional e das eficiências nutricionais de C, N e P limitavam-se as plantas de cana-de-açúcar sob déficit hídrico máximo de 30 dias após o transplântio (Teixeira et al., 2020b) e em plantas de cana-de-açúcar sem estresse hídrico (Frazão et al., 2020). Portanto, os resultados evidenciados nesta pesquisa indicam pela primeira vez que os efeitos do Si nas relações estequiométricas Si:C:N:P e nas eficiências de uso de C, N e P tem potencial benéfico muito relevante

ao atenuar déficit hídrico severo por um período intermediário (até 60 dias) e longo (até 160 dias). Portanto, devem ser consideradas para o melhor entendimento de como o Si contribui para mitigação do déficit hídrico em plantas de cana-de-açúcar e de cana-energia cultivadas sob esta condição até a fase de perfilhamento ou formação inicial dos colmos.

Contudo, foi observado efeito benéfico do Si no aumento da eficiência de uso de P em plantas de cana-energia que receberam aplicação de Si apenas durante a fase de produção das mudas. Esse fato pode justificar a inexistência de efeito do elemento no incremento de massa seca das folhas, colmos e da parte aérea da cana-energia cultivada sob déficit hídrico até a fase de perfilhamento. Porém, nota-se que o efeito do Si é potencializado com aplicações complementares do elemento após o transplântio, sendo suficiente para causar efeito benéfico no aumento da eficiência de uso de C, N e P e na diminuição das perdas na produção de massa seca, inclusive em plantas de cana-energia.

A ausência de efeito benéfico mitigador do Si observado no cultivo de plantas da cana-energia sob déficit hídrico severo de 7 até 60 dias após o transplântio, pode ser atribuído a menor absorção de Si, pois foi aplicado somente na formação das mudas e porque houve a retirada de cerca de 1/3 da biomassa foliar momento antes do transplântio da planta ao solo. Observou-se também nesta espécie que não houve efeito do Si no aumento da eficiência de uso do P e apesar de ter afetado os outros nutrientes, mas essa contribuição foi insuficiente para melhorar a produção de biomassa da cana-energia. Portanto, a eficiência de uso de P parece ser um mecanismo importante que o Si modifica para atenuar o déficit hídrico ocorrido na fase mais inicial do cultivo, ou seja, no perfilhamento da planta.

Os resultados da pesquisa permitem aceitar a hipótese de que os danos causados pelo déficit hídrico na produção de massa seca da cana-de-açúcar e da cana-energia devem-se ao desequilíbrio da homeostase nutricional, que por sua vez diminui a eficiência de uso de C, N e P. Evidenciou-se também que o fornecimento do Si pode reverter esses efeitos especialmente no período que a planta recebeu mais o elemento benéfico, com aplicações na fase de produção de mudas e com complementação após o transplântio para campo pois isso ocorreu nas duas espécies

estudadas diferentemente quando a planta recebeu menor quantidade de Si restrito apenas na fase de formação de mudas, a qual o elemento beneficiou apenas a cana-de-açúcar.

O caráter inovador desta pesquisa é que o uso do Si otimizado permitiu o uso de mudas pré-brotadas da cana-de-açúcar e da cana-energia, que foi grande avanço no sistema de plantio destas culturas embora sendo mais sensível ao estresse hídrico. Pela primeira vez é indicado o potencial do Si em solução (fertirrigação e foliar) aplicado na fase de formação da muda e no crescimento inicial da planta em doses relativamente baixa ( $<20 \text{ kg ha}^{-1}$  de Si). A baixa dose diminui os riscos ambientais e é suficiente para melhorar o uso sustentável da água (mais biomassa com menos água) no período crítico de estabelecimento destas culturas. Espera-se que essa técnica seja amplamente utilizada pelos gestores envolvidos na cadeia de produção da cana-de-açúcar e da cana-energia tendo implicação ampla devido a importância da indústria destas culturas para suprimento global das necessidades presentes e futuras de bioenergia com sustentabilidade hídrica.

## 5 Conclusão

O dano causado pelo déficit hídrico nas plantas deve-se ao desequilíbrio da homeostase nutricional, que por sua vez diminui a eficiência de uso de C, N e P e conseqüentemente o acúmulo de biomassa da cana-de-açúcar e da cana-energia, mas isso é revertido por modificar a estequiometria C:N:P e incrementar a eficiência de uso do C, N e P devido ao fornecimento do Si via fertirrigação e pulverização foliar dependendo da espécie e do tempo da restrição hídrica.

A pesquisa propõe o fornecimento de Si na fase de produção de mudas para atenuar o déficit hídrico severo intermediário, ou seja, até 60 dias após o transplante apenas para o cultivo da cana-de-açúcar, mas se complementar o elemento benéfico após o transplante da planta é possível atenuar esse estresse hídrico ampliando para até 160 dias após o transplante para as duas espécies estudadas.

## 6 Referências

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 01 de abril de 2021.

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

Bataglia OC, Furlani AMC, Teixeira JPF, Furlani PR, Gallo JR (1983) **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: IAC, 48p.

Besharat S, Barão L, Cruz C (2020) New strategies to overcome water limitation in cultivated maize: Results from sub-surface irrigation and silicon fertilization. **Journal of Environmental Management** 263:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110398>

Bezerra BKL, Lima GPP, dos Reis AR, Silva MA, de Camargo MS (2019) Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum** 41:189-189. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>

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

Boaretto LF, Carvalho G, Borgo L, Creste S, Landell MGA, Mazzafera P, Azevedo RA (2014) Plant physiology and biochemistry water stress reveals differential antioxidant responses of tolerant and non-tolerant sugarcane genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry** 74:165–175. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.11.016>

Brouder SM, Volenec JJ (2008) Impact of climate change on crop nutrient and water use efficiencies. **Physiologia Plantarum** 133:705–724. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01136.x>

Camargo MS, Honaine MF, Osterrieth M, Bozza NG, Silva MV, Benvenuto ML, de Almeida SM (2021) 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** 1:1-15. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05063-z>

Cardozo NP, Bordonal RO, La Scala N (2018) Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. **Journal of Cleaner Production** 204:861–87. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.004>

Cavalcante VS, Prado RM, Vasconcelos RL, Campos CNS (2016) Iron concentrations in sugar cane (*Saccharum officinarum* L.) cultivated in nutrient solution. **Agrociencia** 50:867–875

Detmann KC, Araújo WL, Martins SCV, Fernie AR, DaMatta FM (2013) Metabolic alterations triggered by silicon nutrition: Is there a signaling role for silicon? **Plant Signaling & Behavior** 8:71–74. <https://doi.org/10.4161/psb.22523>

Dingre SK, Gorantiwar SD, Kadam SA (2021) Correlating the field water balance derived crop coefficient (Kc) and canopy reflectance-based NDVI for irrigated sugarcane. **Precision Agriculture** 22:1134–1153. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09774-8>

Elser JJ, Hamilton A (2007) Stoichiometry and the new biology: The future is now. **PLoS Biology** 5:1403–1405. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0050181>

Embrapa (1997) **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 212p.

Fernández V, Brown PH (2013) From plant surface to plant metabolism: the uncertain fate of foliar-applied nutrients. **Frontiers in Plant Science** 4:1–5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00289>

Frazão JJ, Prado R de M, de Souza Júnior JP, Rossatto DR (2020) Silicon changes C:N:P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. **Scientific Reports** 10:1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69310-6>

He C, Ma J, Wang L (2015) A hemicellulose-bound form of silicon with potential to improve the mechanical properties and regeneration of the cell wall of rice. **New Phytologist** 206:1051–1062. <https://doi.org/10.1111/nph.13282>

He SS, Zeng Y, Liang ZX, Jing Y, Tang SY, Zhang B, Yan H, Li S, Xie T, Tan F, Li M (2021) Economic evaluation of water-saving irrigation practices for sustainable

sugarcane production in Guangxi Province, China. **Sugar Tech**  
<https://doi.org/10.1007/s12355-021-00965-9>

Hoagland DR, Arnon DI (1950) **The water-culture method for growing plants without soil**. Berkeley: Circular 247, 32p.

Hurtado AC, Chiconato DA, Prado R de M, Sousa Junior GS, Gratão PL, Felisberto G, Viciado DO, Santos DMM (2020) Different methods of silicon application attenuate salt stress in sorghum and sunflower by modifying the antioxidative defense mechanism. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 203:110964.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110964>

Isa M, Bai S, Yokoyama T, Ma JF, Ishibashi Y, Yuasa T, Iwaya-Inoue M (2010) Silicon enhances growth independent of silica deposition in a low-silica rice mutant, Isi1. **Plant and Soil** 331:361–375. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0258-9>

Korndörfer GH, Pereira HS, Nolla A (Eds) (2004) **Análise de silício no solo, planta e fertilizantes**. Uberlândia: UFU, 50p.

Kraska JE, Breitenbeck GA (2010) Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 41:2075–2085.  
<https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>

Kubicki JD, Heaney PJ (2003) Molecular orbital modeling of aqueous organosilicon complexes: Implications for silica biomineralization. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 67:4113–4121. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00093-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00093-3)

Kudryavtsev PG, Figovsky OL (2016) Nanocomposite organomineral hybrid materials. Part I. **Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal** 8:16–49.  
<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2016-8-3-16-56>

Landell MGA, Campana MP, Figueiredo P, Xavier MA, Anjos I A, Dinardo-Miranda LL, Scarpari MS, Garcia JC, Bidóia MAP, Silva DN, Mendonça JR, Kanthack RAD, Campos MF, Brancalhão SR, Petri RH, Miguel PEM (2012). **Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 22p (Documentos, 109).

Ma J, Takahashi E (1990) Effect of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice. **Plant and Soil** 126:115–119. <https://doi.org/10.1007/BF00041376>

Matsuoka S, Kennedy AJ, Santos EGD, Tomazela AL, Rubio LCS (2014) Energy cane: Its concept, development, characteristics, and prospects. **Advances in Botany** 1:1–13. <https://doi.org/10.1155/2014/597275>

Mitani-Ueno N, Ma JF (2021) Linking transport system of silicon with its accumulation in different plant species. **Soil Science and Plant Nutrition** 67:10-17. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1845972>

Murozuka E, Laursen KH, Lindedam J, Shield IF, Bruun S, Magid J, Møller IS, Schjoerring JK (2014) Nitrogen fertilization affects silicon concentration, cell wall composition and biofuel potential of wheat straw. **Biomass and Bioenergy** 64:291–298. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.034>

Neethirajan S, Gordon R, Wang L (2009) Potential of silica bodies (phytoliths) for nanotechnology. **Trends in Biotechnology** 27:461–467. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.05.002>

Neu S, Schaller J, Dudel EG (2017) Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports** 7:3–10. <https://doi.org/10.1038/srep40829>

Prado R de M (Ed) (2021) **Mineral nutrition of tropical plants**, Springer: International Publishing, 392p.

Prado RM, Silva GP (2017) Ecological response to global change: changes in C:N:P Stoichiometry in environmental adaptations of plants. **Plant Ecology - Traditional Approaches to Recent Trends**. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69246>

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

Raven JA (1983) The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews** 58:179–207. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185x.1983.tb00385.x>

Rocha JR, de Mello Prado R, Teixeira GCM, de Oliveira Filho ASB (2021) Si fertigation attenuates water stress in forages by modifying carbon stoichiometry, favouring physiological aspects. **Journal of Agronomy and Crop Science** 1:1–13. <https://doi.org/10.1111/jac.12479>

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumberras JF, Coelho MR, Almeida JÁ, Araújo Filho JC, Oliveira JB, Cunha TJ (2018) **Brazilian soil classification system**, 2a. Brasília: Embrapa Soils.

Schaller J, Brackhage C, Gessner MO, Bäuker E, Gert Dudel E (2012) Silicon supply modifies C:N:P stoichiometry and growth of *Phragmites australis*. **Plant Biology** 14:392–396. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2011.00537.x>

Schaller J, Cramer A, Carminati A, Zarebanadkouki M (2020) Biogenic amorphous silica as main driver for plant available water in soils. **Scientific Reports** 10:1–7. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59437-x>

Schoelynck J, Bal K, Backx H, Okruszko T, Meire P, Struyf E (2010) Silica uptake in aquatic and wetland macrophytes: A strategic choice between silica, lignin and cellulose? **New Phytologist** 186:385–391. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03176.x>

Siddiqi MY, Glass ADM (1981) Utilization index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition** 4:289–302. <https://doi.org/10.1080/01904168109362919>

Szabados L, Savouré A (2010) Proline: a multifunctional amino acid. **Trends in Plant Science** 15:89–97. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.11.009>

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

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

Teixeira GCM, Prado RM, Rocha AMS (2021) Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water deficit damage in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science** 00, 1–10. <https://doi.org/10.1111/jac.12511>

Verma KK, Song XP, Zeng Y, Guo DJ, Singh M, Rajput VD, Malviya MK, Wei KJ, Sharma A, Li DP, Chen GL, Li YR (2021) 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** 166:582–592. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.032>

Viciedo DO, Prado R de M, Martínez CA, Habermann E, Piccolo MC, Hurtado AC, Barreto RF, Calzada KP (2021) Changes in soil water availability and air-temperature impact biomass allocation and C:N:P stoichiometry in different organs of *Stylosanthes capitata* Vogel. **Journal of Environmental Management** 278:111540. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111540>

Viciedo DO, Prado R de M, Martínez CA, Habermann E, Piccolo MC (2019) Short-term warming and water stress affect *Panicum maximum* Jacq. stoichiometric homeostasis and biomass production. **Science of the Total Environment** 681:267–274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.108>

Xie K, Cakmak I, Wang S, Zhang F, Guo S (2020) Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. **The Crop Journal** 9:249–256. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.10.005>

Yoshida S (1965) Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant. **Bulletin of the National Institute of Agricultural Sciences Series B** 15:1-58.