

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DO DÉFICIT HÍDRICO DE MUDAS  
PRÉ-BROTADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR NA FASE INICIAL  
DE CRESCIMENTO**

**Gelza Carliane Marques Teixeira**

Engenheira Agrônoma

**2018**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DO DÉFICIT HÍDRICO DE MUDAS  
PRÉ-BROTADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR NA FASE INICIAL  
DE CRESCIMENTO**

**Gelza Carliane Marques Teixeira**

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

**Coorientadora: Profa. Dra. Carolina Fernandes**

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

**2018**

T266s Teixeira, Gelza Carliane Marques  
Silício na mitigação do déficit hídrico em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar na fase inicial de desenvolvimento / Gelza Carliane Marques Teixeira. – – Jaboticabal, 2018  
vii, 41 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018  
Orientador: Renato de Mello Prado  
Banca examinadora: Itamar Andrioli, Cid Naudi Silva Campos  
Bibliografia

1. Elemento benéfico. 2. Estresse abiótico. 3. Pulverização foliar. 4. Seca. 5. *Saccharum officinarum* L. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.4:633.61



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**


TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DO DÉFICIT HÍDRICO DE MUDAS PRÉ-BROTADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR NA FASE INICIAL DE CRESCIMENTO


**AUTORA: GELZA CARLIANE MARQUES TEIXEIRA**

**ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO**

**COORIENTADORA: CAROLINA FERNANDES**

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

  
Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO  
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dr. ITAMAR ANDRIOLI  
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Dr. CID NAUDI SILVA CAMPOS  
Universidade Federal do Mato Grosso do Sul / UFMGS-Chapadão do Sul/MS

Jaboticabal, 01 de agosto de 2018

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**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, na modalidade monitora de Química. Em março de 2017, ingressou no curso de mestrado no 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. Participou de uma missão de estudos na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), pelo Programa de Cooperação Acadêmica (PROCAD). Atualmente, é membra do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da Unesp (GENPLANT).

Dificuldades preparam pessoas comuns para destinos extraordinários.

(C.S. Lewis)

Minha estrela, Maria do Carmo Teixeira (*in memoriam*), que mesmo em outro plano está comigo todos os dias. Mãe, a sua lembrança diária é minha maior força.

Dedico também a minha sobrinha, Nayra, por ver, mesmo com toda sua inocência, tendo de passar por uma realidade muito semelhante à que eu vivi na mesma idade.

**Dedico**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao bondoso Deus pelo sustento espiritual e por me dar forças para resistir às dificuldades que sempre surgiram em minha vida, em especial durante o mestrado acadêmico. Agradeço também a minha família que, apesar de distante e de ter sido contrária ao meu ingresso na pós-graduação, sempre foi o principal motivo para buscar conquistas maiores, em especial meus irmãos e sobrinhos, que eu desejo e luto para que tenham oportunidades como 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 solteira, que sempre morou na periferia, na simplicidade de uma família de maranhenses humildes 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 seu amor permitindo-me provar de sentimentos afetuosos de carinho, amor e admiração, que considero os principais combustíveis para impulsar um cidadão que possui a ambição de mudar sua condição atual.

O mestrado foi uma fase de muita dificuldade, desde encarar uma mudança radical em minha vida até a realidade de não possuir condições financeiras suficientes e matricular-me sem a possibilidade de receber bolsa. No entanto, durante esse período, eu mergulhei em uma diversidade de situações que me fizeram crescer profissional e emocionalmente.

Na fase inicial, tive a graça de possuir pessoas incríveis que me ajudaram, inclusive financeiramente, como a Luanna Gomes e toda sua família (Vanuza, Tio Agnon e Ule), a dona Rosinha e todos de Sampaio. Assim como os amigos Lídia, Lohana, Gernilane, Walas, Daryel, Marcos, Sebastião, Dheime e Natanael, agradeço pelo apoio e pelo carinho de sempre, e peço que o Senhor continue abençoando-os e espero um dia retribuir tudo que fizeram por mim.

Depois do ingresso, tive a oportunidade de conhecer e aprender muito com meu orientador, Dr. Renato de Mello Prado, por quem possuo uma grande admiração e profundo respeito. Também sou muito grata pelos ensinamentos, oportunidades, paciência e preocupação com minha formação.



Agradeço também a Deus por ter-me permitido conhecer meu namorado, Antonio Márcio Souza Rocha, uma pessoa que possui uma das virtudes mais admiradas por mim, que é o espírito de bondade e empatia. E que desde o início de nosso relacionamento sempre foi a pessoa que nunca mediu esforços para ajudar-me e inclusive sacrificou-se física e emocionalmente para estar ao meu lado. Espero que nosso sentimento cresça dia após dia e que possamos fazer o bem um para o outro. Amo-o e agradeço-lhe por ter-me ajudado a evoluir.

Agradeço aos amigos que a UNESP me deu, como a Marcilene, o Fernando, Bruno, Joel, Miquéias, Adailza, Michael, Leonardo, Clebson que, direta ou indiretamente, ajudaram-me durante esta fase.

Agradeço aos colegas do grupo Genplant (Grupo de Estudos em Nutrição de plantas da Unesp), Gilmara, Jonas, Guilherme, Rafael e Kamilla, pela acolhida e por todos os momentos de aprendizado vividos. Em especial ao Luís Cláudio, que me auxiliou de maneira importante na fase inicial dos experimentos do mestrado. Agradeço ao Departamento de Solos e Adubos e a todos os funcionários que me ajudaram, em especial ao Adalto e ao Gibson.

Agradeço às técnicas dos laboratórios de Nutrição de Plantas e Fisiologia Vegetal, Claudinha e Soninha, respectivamente, pela paciência e colaboração durante as análises dos experimentos.

Agradeço ao colega Luis Batista, pelo fornecimento das mudas usadas nos experimentos.

Agradeço aos professores que tive durante o mestrado, como Prof. Arthur Bernardes, Profa. Priscila Lupino, Prof. Pedro Luiz, Profa. Mara Cristina, Prof. Rinaldo de Paula, Prof. Jairo Cazetta e Profa. Carolina Fernandes, que me ajudaram em disciplinas cursadas durante o mestrado e/ou durante a realização de análises no experimento.

Agradeço ao programa PROCAD e à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, em nome do Prof. Cid Naudi Campos, que me recebeu e também contribuiu para a 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, Obrigada!

## SUMÁRIO

<b>APRESENTAÇÃO</b> .....	<b>ii</b>
<b>RESUMO -</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>vi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>2</b>
2.1 Uso de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (MPB).....	2
2.2 O estresse por deficiência hídrica .....	4
2.3 Silício na mitigação do déficit hídrico .....	6
2.4 Pulverização foliar de silício (Si) .....	7
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>9</b>
3.1 Experimento 1: Fontes e concentrações de silício foliar em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar .....	9
3.1.1 Material vegetal e condições de crescimento .....	9
3.1.2 Tratamentos e delineamento experimental .....	10
3.1.3 Análises realizadas .....	11
3.1.4 Análise estatística .....	12
3.2 Experimento 2: Silício em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar mitiga os efeitos do déficit hídrico após o transplante.....	12
3.2.1 Material vegetal e condições de crescimento .....	12
3.2.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	13
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>18</b>
4.1 Experimento 1 .....	18
4.2 Experimento 2 .....	21
<b>5 DISCUSSÃO</b> .....	<b>28</b>
5.1 Experimento 1 .....	28
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>33</b>
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>34</b>

## APRESENTAÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas do mundo, cultivada em mais de 100 países, destacando-se Brasil, Índia e China. Uma das mais recentes inovações tecnológicas nesta cultura surgiu com o emprego de mudas pré-brotadas que seriam utilizadas para seu plantio no campo. O uso destas mudas pré-brotadas iria potencializar o estabelecimento desta cultura no campo, aumentando o vigor, a uniformidade genética e a isenção de pragas e de doenças no estabelecimento dos cultivos e, conseqüentemente, a produtividade sustentável do canavial durante 5 a 8 anos de cultivo. No entanto, essas mudas são muito sensíveis ao déficit hídrico no momento do plantio no campo, sendo o déficit hídrico de ocorrência comum durante o plantio da cana-de-açúcar nas principais regiões de cultivo. Diante desta problemática, surgiu este trabalho, trazendo como opção o emprego do silício durante a formação dessas mudas para aumentar sua tolerância no momento do transplante para o campo. Na literatura, têm-se informações pontuais afirmando que o silício poderia diminuir os danos do estresse hídrico em culturas distintas das mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. Diante da falta de informações sobre o tema, surgem algumas hipóteses. Se o silício fornecido na produção das mudas teria um efeito residual efetivo quando elas forem transplantadas em solo com déficit hídrico. E como o silício poderia afetar a fisiologia da planta, caso tivesse efeito atenuador do estresse hídrico. Por fim, qual seria a melhor forma de fornecer o silício para as mudas: seria via solução nutritiva para nutrir as raízes ou se poderia ser realizado apenas via pulverização foliar. Para atender a esses questionamentos, desenvolveu-se este estudo, onde se objetivou determinar a concentração que poderia aumentar o acúmulo de Si e a produção de massa seca na fase de formação de mudas pré-brotadas e avaliar se esse acúmulo prévio do elemento, em relação ao fornecimento de Si via solução nutritiva, poderia mitigar os danos causados pelo déficit hídrico aos trinta dias após o transplante ao solo. Para atingir esses objetivos, o estudo foi desenvolvido em duas etapas. Primeiramente, foram avaliados o incremento no acúmulo de Si e a massa seca da parte aérea em concentrações baixas, sendo determinado qual a concentração que promoveu maior acúmulo de biomassa. Posteriormente, foi avaliado se o fornecimento de Si na fase de produção das MPBs poderia mitigar os danos

causados pelo déficit hídrico após o transplante e se haveria diferença entre o fornecimento por pulverização foliar e por solução nutritiva (via radicular). Os resultados obtidos na fisiologia e no crescimento das mudas pré-brotadas fundamentam indicar o emprego do Si na solução nutritiva de cultivo das mudas pré-brotadas como prática agrícola inédita e importante para atenuar problemas hídricos nos cultivos, durante seu estabelecimento. Diante da expansão mundial do uso de mudas pré-brotadas nos cultivos de cana-de-açúcar, esses resultados devem contribuir para o fortalecimento desta tecnologia nos campos de produção da cana-de-açúcar.

## SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DO DÉFICIT HÍDRICO DE MUDAS PRÉ-BROTADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR NA FASE INICIAL DE CRESCIMENTO

**RESUMO** - O uso de mudas pré-brotadas (MPB) tem-se expandido nos plantios da cana-de-açúcar, mas a ocorrência de baixa disponibilidade hídrica durante a fase de transplântio pode comprometer o rendimento da cultura. O silício (Si) pode reduzir os efeitos causados pelo déficit hídrico, podendo ser fornecido via fertirrigação (solução nutritiva) ou pela pulverização foliar, mas esses efeitos em MPB ainda são incipientes. Objetivou-se: (a) avaliar o efeito de fontes e concentrações de Si via pulverização foliar em relação ao silicato de potássio, no acúmulo do elemento e na produção de biomassa em MPBs; (b) avaliar se a aplicação de Si via solução nutritiva (radicular) e via pulverização foliar nas MPBs pode mitigar o déficit hídrico após seu transplântio no solo. Inicialmente, foram desenvolvidos dois experimentos em delineamento em blocos casualizados (DBC), com os tratamentos em esquema fatorial 4x5, com 5 repetições. Foram testadas nos dois experimentos quatro fontes de Si (nanossilica, ácido monossilícico estabilizado com PEG-400, silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol e silicato de potássio, em cinco concentrações: 0; 0,25; 0,5; 0,75 e 1,0 mmol L<sup>-1</sup> (primeiro experimento) e 0; 1; 2; 3 e 4 mmol L<sup>-1</sup> (segundo experimento). No terceiro experimento, foi avaliado o efeito do Si na mitigação dos danos causados pelo déficit hídrico, sendo o experimento desenvolvido em DBC, e os tratamentos, em esquema fatorial 3x3, tendo o fornecimento de Si via solução nutritiva (radicular) (2 mmol L<sup>-1</sup>), Si via foliar (3,4 mmol L<sup>-1</sup> em 5 pulverizações) e controle (sem Si) em três níveis de disponibilidade hídrica do solo (70; 50 e 30% da capacidade de retenção de água no solo). O fornecimento de Si via pulverização foliar aumentou o acúmulo do elemento e a massa seca da parte aérea, destacando as fontes de Si com estabilizante em relação ao silicato de potássio. As concentrações testadas foram suficientes para atingir máximo acúmulo de massa seca da parte aérea nas fontes ácido monossilícico estabilizado com PEG-400 e silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol, nas concentrações de 3,19 e 3,41 mmol L<sup>-1</sup>, respectivamente. Na ausência de Si, o déficit hídrico prejudicou as variáveis fisiológicas, de crescimento e a produção de massa seca das plantas. O fornecimento de Si via solução nutritiva destacou-se da via pulverização foliar, na formação das mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar, por ser mais eficiente em reduzir danos causados pelo déficit hídrico nos primeiros trinta dias após o transplântio. O Si via solução nutritiva foi importante nas mudas pré-brotadas, transplantadas em solo sob déficit hídrico, por aumentar a eficiência quântica do fotossistema II, o teor de clorofila, o potencial hídrico foliar, o conteúdo de água e por diminuir o extravasamento de eletrólitos celulares, o conteúdo de prolina livre e por permitir o maior crescimento e a produção de biomassa.

**Palavras-chave:** elemento benéfico, estresse abiótico, pulverização foliar, seca, *Saccharum officinarum* L.

## SILICON IN THE MITIGATION OF THE WATER DEFICIT OF PRE-BUDDING SEEDLINGS SUGAR CANE CHANGES IN THE INITIAL GROWTH PHASE

**ABSTRACT** – The use of pre-budding seedlings (MPB) has expanded in the sugarcane plantation, but the occurrence of low water availability during the transplanting phase may compromise the yield of the culture. Silicon (Si) can reduce the effects caused by water deficit, being supplied via fertigation (nutritive solution) or foliar pulverization, but these effects in MPB are still incipient. It was aimed at: (a) to evaluate the effect of sources and concentrations of Si via foliar spray in relation to potassium silicate, in the accumulation of the element and in the production of biomass in MPBs; (b) to evaluate the application of Si via nutritive solution (root) and via foliar spray in MPBs can mitigate the hydric deficit after its transplantation not only. Initially, there were two experiments in delineation in casualized blocks (DBC), with treatments in 4x5 factorial scheme, with 5 repetitions. In two experiments, four sources of Si (nanosilicic, monosilicic acid stabilized with PEG-400, sodium silicate and potassium stabilized with sorbitol and potassium silicate) were tested in five concentrations: 0; 0.25; 0.5; 0.75 and 1.0 mmol L<sup>-1</sup> (first experiment) and 0; 1; 2; 3 and 4 mmol L<sup>-1</sup> (second experiment). In the third experiment, the effect of Si was evaluated in the mitigation of damages caused by water deficit, being the experiment developed in DBC, and the treatments, in 3x3 factorial scheme, had the supply of Si via nutritive solution (root) (2 mmol L<sup>-1</sup>), Si via foliar (3.4 mmol L<sup>-1</sup> in 5 pulverizações) and control (without Si) in three levels of soil water availability (70, 50 and 30% of soil water retention capacity). The supply of Si via foliar pulverization increased the accumulation of the element and the dry mass of the aerial part, highlighting the sources of Si with stabilizer in relation to the silicate of potassium. The concentrations tested were sufficient to achieve maximum accumulation of dry mass of the aerial part in monosilicic acid sources stabilized with PEG-400 and sodium silicate and potassium silicate stabilized with sorbitol, in concentrations of 3.19 and 3.41 mmol L<sup>-1</sup>, respectively. In the absence of Si, the hydric deficit affected the physiological variables, of growth and the production of dry mass of the plants. The supply of Si via nutritive solution stood out from foliar spraying, in the formation of pre-sprouted sugar cane seedlings, as it is more efficient in reducing damage caused by water deficit in the first thirty days after transplanting. The nutritive solution was important in the pre-sprouted seedlings, transplanted only on water deficit, by increasing the quantum efficiency of the photosystem II, the chlorophyll theory, the foliar water potential, the water content and by diminishing the extravasation of cellular electrolytes, the free proline content and by allowing the greatest growth and biomass production.

**Keywords:** beneficial element, abiotic stress, foliar spraying, dry, *Saccharum officinarum* L.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Temperatura e umidade máximas e mínimas da casa de vegetação durante a execução dos dois experimentos. Setas indicam as datas das pulverizações foliares (1 <sup>a</sup> , 2 <sup>a</sup> , 3 <sup>a</sup> , 4 <sup>a</sup> e 5 <sup>a</sup> SiF) e coleta das plantas do 1 <sup>o</sup> e 2 <sup>o</sup> experimentos (exp.).....	10
<b>Figura 2.</b>	Temperatura e umidade do ar máximas e mínimas no interior da casa de vegetação durante a execução do experimento. Setas indicam as datas de início do fornecimento de Si via radicular (SiR), das aplicações de Si via foliar (1 <sup>a</sup> , 2 <sup>a</sup> , 3 <sup>a</sup> , 4 <sup>a</sup> e 5 <sup>a</sup> SiF), início do déficit hídrico e coleta das plantas.....	13
<b>Figura 3.</b>	Acúmulo de Si na parte aérea em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob fontes (F): nanossílica (Nano); ácido monossilícico estabilizado PEG-400 (Si Ac.); silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol (Si Alc.), e silicato de potássio (Si K.) e concentrações (C): 0; 0,25; 0,5; 0,75 e 1,0 mmol L <sup>-1</sup> (a) e 0; 1; 2; 3 e 4 mmol L <sup>-1</sup> (b) de Si aplicado via pulverização foliar.....	19
<b>Figura 4.</b>	Massa seca da parte aérea em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob fontes (F): nanossílica (Nano); ácido monossilícico estabilizado PEG-400 (Si Ac.); silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol (Si Alc.), e silicato de potássio (Si K.) e concentrações (C): 0; 0,25; 0,5; 0,75 e 1,0 mmol L <sup>-1</sup> (a) e 0; 1; 2; 3 e 4 mmol L <sup>-1</sup> (b) de Si aplicado via pulverização foliar.....	20
<b>Figura 5.</b>	Acúmulo de silício (Si) na parte aérea de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70; 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (Sem Si: -Si; Si radicular: SiR; Si foliar: SiF).....	21
<b>Figura 6.</b>	Eficiência quântica do FSII (Fv/Fm) de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70; 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (Sem Si: -Si; Si radicular: SiR; Si foliar: SiF).....	22
<b>Figura 7.</b>	Clorofila a (Chla) (a), clorofila b (Chlb) (b), clorofila a+b (Chla+b) (c) e carotenoides (d) de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70; 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (Sem Si: -Si; Si radicular: SiR; Si foliar: SiF).....	23
<b>Figura 8.</b>	Índice de extravasamento de eletrólitos (a) e potencial hídrico foliar ( $\Psi_p$ ) (b) de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70; 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (Sem Si: -Si; Si radicular: SiR; Si foliar: SiF).....	24

- Figura 9.** Prolina livre (a) e conteúdo relativo de água (b) de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70; 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (Sem Si: -Si; Si radicular: SiR; Si foliar: SiF)..... 25
- Figura 10.** Altura da planta (a), diâmetro do colmo (b) e número de perfilhos (c) de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70; 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (Sem Si: -Si; Si radicular: SiR; Si foliar: SiF)..... 26
- Figura 11.** Efeito do fornecimento de Si no crescimento pós transplântio de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70; 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (Sem Si: -Si; Si radicular: SiR; Si foliar: SiF)..... 27
- Figura 12.** Massa seca da parte aérea (a), massa seca da raiz (b) e massa seca da planta inteira (c) de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70; 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (Sem Si: -Si; Si radicular: SiR; Si foliar: SiF)..... 28



## 1 INTRODUÇÃO

O sistema de mudas pré-brotadas (MPB) consiste na individualização das gemas da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) para a emergência do broto prévia ao transplântio. As vantagens da utilização desta técnica incluem a redução de 90% do volume de colmo gasto por hectare para a reforma da área de cultivo, o aumento na taxa de multiplicação, a sanidade e a uniformidade nos cultivos, além de maior operacionalidade do plantio (LANDELL et al., 2012).

Neste sistema de produção de mudas da cana-de-açúcar, ao usar microtoletes, comparado ao sistema convencional com toletes inteiros, diminuíram as reservas de nutrientes e de água para a planta recém-transplantada no campo. Portanto, existem alguns fatores que podem comprometer a viabilidade do uso dessa técnica, relacionados especialmente à disponibilidade hídrica nos dias subsequentes ao transplântio, pois as mudas são levadas a campo já com área foliar e transpiração ativa (MARTINS et al., 2015). O déficit hídrico, no momento do transplântio das mudas, é comum, pois na maior parte dos canaviais tem-se feito o plantio na época de ausência ou de baixa precipitação pluvial.

Portanto, em cana-de-açúcar, o desenvolvimento inicial é considerado o período mais sensível ao déficit hídrico, sendo definido, inclusive, o rendimento da cultura (SILVA et al., 2012). Desse modo, a busca por estratégias que possam reduzir perdas por déficit hídrico em MPBs tem sido um grande desafio para a manutenção desse sistema de produção com baixa perda de plantas no campo.

O silício (Si) é um elemento que pode mitigar os danos causados pelo déficit hídrico nas plantas, sendo os efeitos vistos em algumas culturas, mas sem resultados em MPB. Esse efeito benéfico do Si deve-se à manutenção do potencial hídrico foliar visto em plantas de milho (AMIN et al., 2014), ajuste de osmólitos compatíveis e redução do estresse oxidativo em plantas de trigo (GONG et al., 2005), preservação de pigmentos fotossintéticos no crescimento inicial da cana-de-açúcar (BOKHTIAR et al., 2012) e aumento na eficiência de uso da água verificado em plantas de arroz (MING et al., 2012), refletindo no melhor desenvolvimento das plantas submetidas ao déficit hídrico.

O fornecimento de Si nas mudas pré-brotadas pode ser via fertirrigação ou pulverização foliar, podendo aumentar o conteúdo do elemento na planta, pois a cana-

de-açúcar é considerada acumuladora do elemento. Em pulverizações foliares, tem-se a opção do silicato de potássio, que é a fonte solúvel mais empregada na nutrição de Si via foliar e para compor a solução nutritiva em diversas culturas. Atualmente, têm surgido novas fontes de Si com uso de estabilizantes como silicato de potássio e sódio estabilizado com estabilizantes polióis e o ácido monossilício estabilizado com PEG, que podem diminuir a polimerização durante a pulverização. Além disso, tem-se a opção da nanossílica de dispersão coloidal em escala nanométrica, estando o elemento na forma de óxido de silício. No entanto, não é conhecido o desempenho agrônomo destas três fontes alternativas comparadas com silicato de potássio, fonte padrão.

Desse modo, é considerado pertinente avaliar qual a fonte de Si via pulverização foliar que pode promover maior acúmulo do elemento em relação ao silicato de potássio, bem como se o Si pode mitigar os efeitos causados pelo déficit hídrico em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar, após o transplântio, e qual a melhor forma de fornecimento do elemento, se por solução nutritiva ou por pulverização foliar, para a obtenção dos efeitos benéficos.

Para isto, objetivou-se avaliar o efeito de fontes alternativas de Si via pulverização foliar em baixas concentrações, em relação ao silicato de potássio, no acúmulo do elemento na planta, bem como avaliar se a aplicação de Si via solução nutritiva ou por pulverização foliar nas mudas pré-brotadas poderia mitigar os efeitos do déficit hídrico de plantas na fase de maior sensibilidade hídrica, após o transplântio.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Uso de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (MPB)**

O Brasil é maior produtor mundial de cana-de-açúcar, sendo a cultura considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao grande potencial na produção de etanol e de seus subprodutos. Além da produção de etanol e açúcar, as unidades de produção têm buscado operar com maior eficiência, inclusive com geração de energia elétrica, auxiliando na redução dos custos e contribuindo para a sustentabilidade da atividade (CONAB, 2018).

A produção sucroalcooleira do Brasil é favorecida tanto pelas características potencias à produção de energia da cultura quanto pela existência de grandes áreas cultiváveis e pelas condições edafoclimáticas favoráveis à cana-de-açúcar. Sua produção, na safra 2017/2018 foi de 633,26 milhões de toneladas, colhida em uma área de 8,73 milhões de hectares. A produção de açúcar atingiu 37,87 milhões de toneladas, e a de etanol, 27,76 bilhões de litros (CONAB, 2018).

O Estado de São Paulo é o maior produtor nacional, com produção de 349,2 milhões de toneladas em 4,5 milhões de hectares, representando cerca de 55 e 51% da produção e de área plantada, respectivamente (CONAB, 2018). Atualmente, áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar, sobretudo no Estado de São Paulo, têm utilizado o sistema de produção de mudas pré-brotadas (MPBs) para a reforma dos canaviais.

As MPBs são produzidas em núcleos específicos de produção a partir da individualização de gemas que são plantadas em tubetes contendo substrato. Durante a fase de formação das mudas, tem-se um alto rigor nutricional, com os nutrientes fornecidos geralmente via fertirrigação ou por pulverizações foliares (LANDELL et al., 2012).

O uso de MPB tem permitido a redução do volume gasto de colmos por hectare pelo aumento da taxa de multiplicação. Estima-se que seja necessária a utilização de apenas 1 Mg de colmos para produzir uma quantidade de mudas suficiente para o plantio de 1 hectare de área, o que representa o aumento de até 19 Mg na quantidade de colmos destinada a produção, seja de açúcar, seja de etanol, considerando que o sistema convencional utiliza geralmente 20 Mg ha<sup>-1</sup> de colmo (XAVIER et al., 2013).

Essa economia de matéria-prima pode ser direcionada à indústria, aumentando a produtividade e os ganhos econômicos. A diminuição da quantidade de colmos permite maior rigor no manejo sanitário, formando mudas de maior qualidade e vigor vegetativo, possibilitando a obtenção de um canavial mais sadio e uniforme. Além disso, tem-se maior operacionalidade durante o plantio, reduzindo o tráfego de máquinas, a compactação do solo e os custos com a prática agrícola (GÍRIO et al., 2015).

Contudo, ainda existem alguns fatores que podem comprometer a eficiência na utilização dessa técnica, especialmente relacionados à disponibilidade hídrica. A

escassez de água durante a fase inicial de desenvolvimento pode comprometer o rendimento e o vigor vegetativo da cultura, além de ser um fator determinante na fase de transplântio das mudas a campo. A sensibilidade de mudas obtidas pelo sistema MPBs na fase de transplântio é ainda mais intensa porque as plantas são levadas a campo já com área foliar, transpiração ativa e, diferentemente do sistema convencional, a reversa energética fornecida pelo colmo é removida (LANDELL et al., 2012).

Essa limitação, aliada aos cenários futuros das mudanças climáticas podem comprometer a viabilidade de utilização dessa técnica, se não houver maior estruturação da mesma. Desse modo, a utilização de estratégias que visem reduzir as perdas na fase subsequente ao transplântio das mudas a campo, pode ser eficiente para o aumento do uso de MPB, aumentando a produtividade e a vida útil do canavial, a partir da atenuação dos efeitos causados pela deficiência hídrica.

## **2.2 O estresse por deficiência hídrica**

Os modelos de mudanças climáticas preveem que a ocorrência e a intensidade das ondas de seca e de calor aumentarão no futuro e levarão à redução da produção agrícola. A alta temperatura e a seca são considerados os fatores mais importantes na limitação da produção vegetal, diminuindo o crescimento das plantas e o rendimento das colheitas em todo o mundo (SUZUKI et al., 2014), sobretudo em cana-de-açúcar, considerando que a irrigação ainda é pouco utilizada nos canaviais devido ao alto custo de implantação.

A deficiência hídrica pode ser entendida como a falta de umidade suficiente para atender à demanda por água para o crescimento normal e à realização dos processos metabólicos essenciais para cada espécie de planta (LI et al., 2009). O consumo diário de água pela cana-de-açúcar varia em função do material genético, do estágio de desenvolvimento, da demanda evapotranspirométrica e das condições de cultivo, estando entre 2 e 6 mm dia<sup>-1</sup> (BERNARDO, 2006).

A fase inicial de desenvolvimento na cana-de-açúcar obtida pelo sistema de produção de mudas pré-brotadas é considerada crítica, pois o transplântio das mudas, na maior parte dos canaviais, ocorre nos meses de janeiro a março, que coincidem, predominantemente, com a época de ausência ou baixa precipitação pluvial,

intensificando os danos causados pelo déficit hídrico, como falhas no canavial e redução de produtividade (LANDELL et al., 2012).

Condições anormais de suprimento de água podem interferir no desenvolvimento das plantas, promovendo modificações na estrutura das membranas e redução na eficiência de utilização de água (ALMEIDA et al., 2012). Em plantas jovens de cana-de-açúcar da cultivar IAC91-5155, a redução na disponibilidade hídrica para níveis de 55 e 40% da capacidade de retenção de água refletiu na redução da produção de massa seca em 32 e 68%, respectivamente (CARLIN e SANTOS, 2009).

A deficiência hídrica pode provocar uma série de reações em cadeia, tais como a inibição da fotossíntese que, por sua vez, leva à redução do uso da radiação incidente, acarretando no acúmulo de poder redutor (NADPH) e redução no pool do aceptor final da cadeia de transporte de elétrons (NADP<sup>+</sup>), gerando uma condição de super-redução da cadeia de transporte de elétrons, que possibilita o escape de elétrons que podem reagir com o oxigênio molecular (O<sub>2</sub>) e formar espécies reativas de oxigênio (EROs) (KIM et al., 2017).

O déficit hídrico promove diversas alterações biométricas e fisiológicas na cultura, como o fechamento parcial de estômatos, a redução na condutância estomática pela menor eficiência aparente de carboxilação da fotossíntese, o aumento do potencial hídrico foliar, a redução do diâmetro do colmo e da área foliar (MARCOS et al., 2018), oxidação dos pigmentos fotossintéticos e de proteínas e maior extravasamento de eletrólitos (MACHADO et al., 2009), fatores considerados de relevante importância para o estabelecimento da cultura a campo, aumento na produtividade e rendimento de sacarose nos cultivos de cana-de-açúcar.

Assim, para satisfazer a demanda global de alimentos e energia da atual e futuras populações, seria necessário o desenvolvimento de culturas com maior tolerância à seca. No entanto, os programas de melhoramento para a cana-de-açúcar são morosos e demandam um grande investimento financeiro. Portanto, é essencial o desenvolvimento de outras estratégias para o manejo do estresse abiótico de natureza hídrica (CAMARGO et al., 2013).

O fornecimento de silício (Si) pode promover efeitos benéficos ao desenvolvimento das culturas, resultando em maiores taxas fotossintéticas e

condutância estomática em comparação com plantas com tratamento deficiente em Si (HATTORI et al., 2005), manutenção do potencial hídrico foliar (AMIN et al., 2014), ajuste de osmólitos compatíveis, como a prolina (GONG et al., 2005), manutenção do conteúdo de água no tecido foliar pela regulação da transpiração, aumentando a eficiência de uso da água em plantas sob condições de deficiência hídrica (HATTORI et al., 2003), e pela melhoria na atividade de enzimas específicas na absorção de água, como as aquaporinas (LIU et al., 2014).

Com base nesses estudos, pode-se supor que o fornecimento de Si pode contribuir de maneira importante na cana-de-açúcar a partir da mitigação dos efeitos do déficit hídrico. No entanto, o efeito da aplicação de Si em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar é incipiente, fazendo-se necessária a realização de pesquisas para esclarecer qual forma de fornecimento do elemento pode ser mais eficiente para favorecer o acúmulo, bem como se o efeito pode mitigar os danos provocados pelo déficit hídrico após o transplante, além de quais os mecanismos responsáveis por esse efeito em MPB.

### **2.3 Silício na mitigação do déficit hídrico**

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante na superfície terrestre, perdendo apenas para o oxigênio (O) (EPSTEIN, 2009), podendo ser encontrado no solo na forma de ácido monossilícico ou ácido ortossilícico [Si(OH)<sub>4</sub>], Si adsorvido com óxidos (Fe, Al e Mn), sílica oriunda da decomposição da matéria orgânica (formas amorfas), ou ainda como Si estrutural em minerais de silicatos (KORNDÖRFER et al., 2002).

O elemento é absorvido pela planta na forma de ácido monossilícico, sendo encontrado em baixos teores ( $<10^{-4}$  M) nessa forma prontamente disponível para as plantas. O acúmulo de Si no tecido vegetal ocorre no sentido ascendente e pode representar até 10% da massa seca total em algumas espécies, como a cana-de-açúcar, assemelhando-se ao de macronutrientes como o nitrogênio (N) e o potássio (K) (EPSTEIN, 2009).

O Si atua de três formas na proteção das plantas: bioquímica, fisiológica e física. Considerando as duas primeiras, o acúmulo de Si nas plantas pode aumentar a capacidade de tolerância à seca, mantendo o potencial hídrico foliar, realizando o

ajuste osmótico, modificando atributos de trocas gasosas como a assimilação de CO<sub>2</sub> e as taxas de transpiração, reduzindo o estresse oxidativo, provocando modificações nos osmólitos, fitormônios e na expressão de genes (FAROOQ e DIETZ, 2015). E física, pela melhoria da arquitetura foliar, proporcionada pela menor abertura do ângulo foliar, deixando as folhas mais eretas, o que, por sua vez, reduz o autossombreamento, além da deposição de Si no apoplasto das folhas, proporcionando maior resistência a danos mecânicos (MA e YAMAJI, 2015).

A manutenção do potencial hídrico foliar em plantas sob condições de deficiência hídrica é uma das principais funções da nutrição com Si, devido à formação de camada dupla de sílica-cutícula nas células epidérmicas da folha (LUX et al., 2002; PEI et al., 2010). Outros efeitos benéficos podem incluir a redução da perda de água por transpiração, melhor osmorregulação e equilíbrio dos mecanismos antioxidantes (ROUPHAEL et al., 2012).

Em cana-de-açúcar, a fertilização com Si via solo, na fase de perfilhamento, proporcionou maior rendimento de sacarose, diâmetro do caule e acúmulo de biomassa em condições de moderado déficit hídrico (55% da capacidade de retenção de água), mesmo para cultivares sensíveis à seca (CAMARGO et al., 2017).

As gramíneas, como a cana-de-açúcar, são consideradas acumuladoras por possuírem transportadores específicos (ZmLsi1 e ZmLsi6), que atuam na absorção e no transporte de Si das raízes para a parte aérea (MITANI et al., 2008). No entanto, existe uma expectativa de que seja possível aumentar a eficiência das aplicações de Si a partir de pulverizações foliares com fontes mais estáveis em baixas concentrações, reduzindo as perdas por polimerização (MA et al., 2011).

Dessa forma, acredita-se que a nutrição com Si seja capaz de promover uma fortificação em plantas de cana-de-açúcar, conferindo resistência às condições de déficit hídrico, sobretudo na fase inicial de desenvolvimento da cultura, considerada a de maior sensibilidade à seca, sobretudo para MPB. Em MPB o fornecimento de Si pode ser realizado via fertirrigação ou por pulverização foliar.

## **2.4 Pulverização foliar de silício (Si)**

O Si em solução pode iniciar sua polimerização a partir da concentração de 3 mmol L<sup>-1</sup> (BIRCHALL, 1995), formando dímeros, trímeros e cadeias poliméricas de Si

(McKEAGUE e CLINE, 1963), que não são absorvidas pelas plantas. Portanto, concentrações baixas de Si devem manter sua forma monomérica, podendo beneficiar a planta com maior absorção do elemento pelas folhas. Para aumentar a quantidade de Si absorvida, seria importante aumentar a frequência das pulverizações do elemento durante o desenvolvimento da planta e utilizar uma fonte adequada.

A fonte de Si mais utilizada para o fornecimento via pulverização foliar, em diferentes espécies, é o silicato de potássio (ZANÃO JÚNIOR et al., 2009), que não contém estabilizante. No entanto, para ampliar as respostas da cana-de-açúcar à pulverização foliar, é importante avançar em estudos com fontes alternativas. Para isso, têm surgido inovações com fontes solúveis, como silicato de sódio e potássio com estabilizante com polióis (sorbitol) e o ácido monossilícico com estabilizante PEG 400. Estes estabilizantes apresentam propriedades umectantes que aumentam a permanência da gota na superfície foliar (BABIKER e DUNCAN, 1974; D'SOUZA e SHEGOKAR, 2016) e, por isso, além de diminuir a velocidade de polimerização do Si, podem aumentar sua absorção por prolongar o tempo de contato da gota com a superfície foliar.

Uma forma de aumentar a concentração de Si na forma monomérica na solução da calda seria empregar a fonte ácido monossilícico ou as fontes solúveis (silicato de potássio ou silicato de sódio e potássio) diluídas ( $\leq 1,0 \text{ mmol L}^{-1}$  de Si) e diminuir o valor pH para abaixo de 6,0, o que induz aumento de espécies monoméricas na solução (KUDRYAVTSEV e FIGOVSKY, 2016).

Além disso, tem-se a opção da nanossílica de dispersão coloidal em escala nanométrica, estando o elemento na forma de óxido de silício, portanto fonte não solúvel. Existem estudos específicos indicando os benefícios da pulverização foliar da nanossílica (WANG et al., 2015) e do ácido monossilícico (LAANE, 2017). No entanto, não é conhecido o desempenho agrônômico destas três fontes alternativas comparadas com silicato de potássio em nenhuma espécie vegetal.

Essas fontes podem favorecer a absorção e o acúmulo do elemento por suas propriedades específicas, porém não existem trabalhos que descreva o efeito dessas fontes em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. É importante conhecer, além da melhor fonte, a concentração adequada do Si na calda para a pulverização. Portanto, o desempenho ótimo de uma determinada fonte deve propiciar a menor taxa de



polimerização em uma concentração que possa favorecer o acúmulo do elemento na planta suficiente para induzir melhorias em seu crescimento.

Diante disso, a pergunta que surge é se as fontes alternativas de Si têm desempenho semelhante ou superior ao silicato de potássio, a fonte padrão utilizada. Se sim, se o emprego do Si na forma de ácido monossilício estabilizado, por estar na forma prontamente disponível e em concentrações baixas do elemento, teria melhor desempenho em pulverização foliar em plantas de cana-de-açúcar, em relação às demais fontes.

Desse modo, objetivou-se avaliar o efeito de fontes de Si via foliar em baixas concentrações, em relação ao silicato de potássio, no acúmulo do elemento e na produção de massa seca, na fase de formação das mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo foi desenvolvido em duas etapas, sendo primeiramente avaliado o efeito de fontes e de concentrações de Si aplicado via pulverização foliar, sendo determinado qual a fonte e a concentração que promoveram maior acúmulo de biomassa na fase de formação das mudas pré-brotadas (Experimento 1).

Em seguida, foi avaliado se o fornecimento de Si na fase de formação das mudas pré-brotadas poderia mitigar os danos causados pelo déficit hídrico após o transplante, comparando o fornecimento via solução nutritiva e por pulverização foliar (Experimento 2).

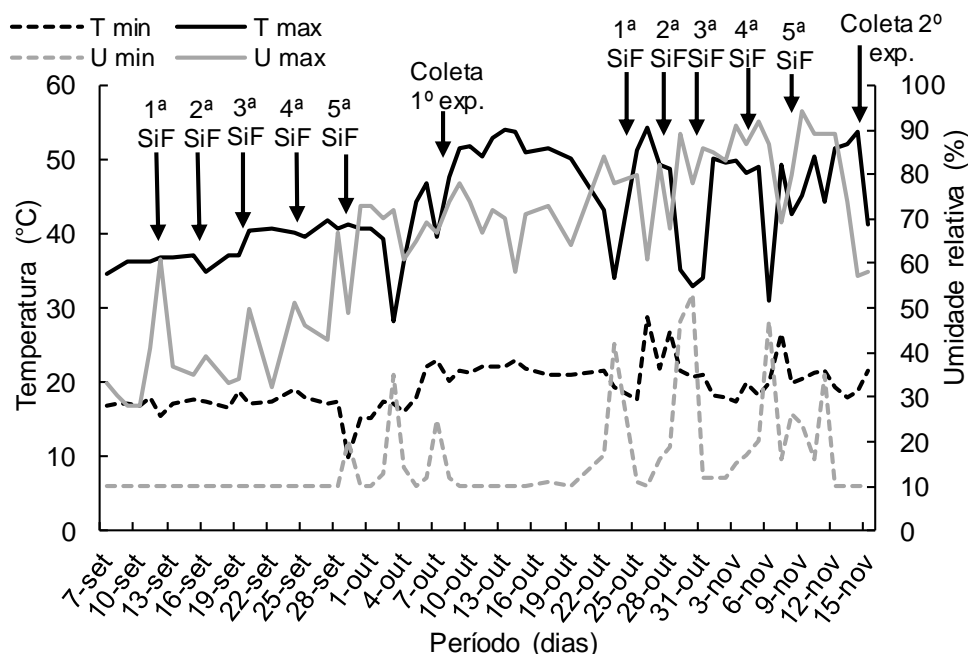
#### **3.1 Experimento 1: Fontes e concentrações de silício foliar em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar**

##### **3.1.1 Material vegetal e condições de crescimento**

Foram desenvolvidos dois experimentos em casa de vegetação da Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Jaboticabal, de setembro a novembro de

2017. As variedades de cana-de-açúcar utilizadas foram SP803280 e CTC 20 no primeiro e no segundo experimento, respectivamente.

As condições ambientais no interior da casa de vegetação foram registradas diariamente com auxílio de termômetro (Figura 1).



**Figura 1.** Temperatura e umidade máximas e mínimas da casa de vegetação durante a execução dos dois experimentos. Setas indicam as datas das pulverizações foliares (1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª SiF) e coleta das plantas do 1º e 2º experimentos (exp.).

### 3.1.2 Tratamentos e delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado em ambos os experimentos foi o de blocos casualizados (DBC), com os tratamentos arranjados em esquema fatorial 4 x 5, sendo quatro fontes de silício: nanossílica Bindizil® (Nano) (77 g L<sup>-1</sup> de Si e pH 10,5); ácido monossilícico estabilizado com PEG-400 (Si Ac.) (13,82 g L<sup>-1</sup> de Si e pH 2,5); silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol (Si Alc.) (107 g L<sup>-1</sup> de Si; 14,9 g L<sup>-1</sup> de Cu, 34,7 g L<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e pH 11,8), e o silicato de potássio – padrão (Si K.) (128 g L<sup>-1</sup> de Si; 126,5 g L<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e pH 12,0) e cinco concentrações: 0; 0,25; 0,5; 0,75 e 1,0 mmol L<sup>-1</sup> no primeiro experimento, e 0; 1; 2; 3 e 4 mmol L<sup>-1</sup> no segundo experimento, com 5 repetições. Foi realizado um balanceamento do potássio a partir da pulverização foliar de uma solução utilizando a fonte cloreto de potássio.

As mudas de cana-de-açúcar utilizadas neste trabalho foram obtidas da biofábrica de MPB (mudas pré-brotadas) da Usina São Martinho, e o cultivo das MPBs nos experimentos correspondeu à fase de produção de mudas, sendo cada muda transplantada para um pote de plástico de 0,7 dm<sup>3</sup> preenchido com areia lavada. O pote continha orifícios na parte de baixo, sendo acondicionado em bandeja de plástico que recebeu a solução nutritiva.

A solução nutritiva usada foi a de Hoagland e Arnon (1950), com alteração na fonte de ferro para Fe-EDDHMA, considerando o dobro da concentração recomendada, conforme indicação de Cavalcante et al. (2016). A concentração da solução nutritiva durante a primeira semana de cultivo foi mantida a 25%, e da segunda semana até o fim do experimento, a concentração foi elevada para 50%. O pH da solução foi mantido em 5,8±0,2 com o uso de solução de HCl ou NaOH, ambos a 1,0 M L<sup>-1</sup>.

O Si foi fornecimento via pulverizações foliares, com intervalos de quatro dias. As aplicações foram realizadas aos 17; 21; 25; 29 e 33 dias após a emergência (DAE), e aos 10; 14; 18; 22 e 26 DAE, no primeiro e no segundo experimento, respectivamente. As aplicações foram realizadas com auxílio de um pulverizador manual, sendo utilizado água deionizada para o preparo da calda de pulverização. As soluções foram preparadas momentos antes da pulverização com Si, e o pH foi mantido em 5,8±0,2.

Em todas as pulverizações foliares de Si, a umidade relativa do ar foi superior a 60%, e a temperatura, inferior a 30°C. Também foi realizado o equilíbrio da quantidade de potássio presente na fonte de Si nos tratamentos, utilizando o KCl.

### **3.1.3 Análises realizadas**

#### **3.1.3.1 Produção de massa seca**

Em ambos os experimentos, as plantas foram separadas em parte aérea e raiz, sendo posteriormente lavadas em água corrente, solução detergente (0,1% v/v), solução de ácido clorídrico (0,3% v/v) e água deionizada. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar (65±5°C), até atingir massa constante. Após a

secagem, a massa seca da parte aérea das plantas foi obtida através do uso de balança analítica (precisão de 0,001 g).

### **3.1.3.2 Análise de silício (Si)**

O conteúdo de Si na parte aérea foi determinado de acordo com a metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004), a qual consiste no método da digestão úmida, pela adição de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) e hidróxido de sódio (NaOH), com a reação induzida em autoclave a 123°C. A determinação do teor de silício foi realizada por espectrofotômetro a 410 nm, pelo método de colorimetria com ácido clorídrico, ácido oxálico e molibdato de amônio. Com base no teor e na massa seca, calculou-se o acúmulo do elemento na parte aérea das plantas.

### **3.1.4 Análise estatística**

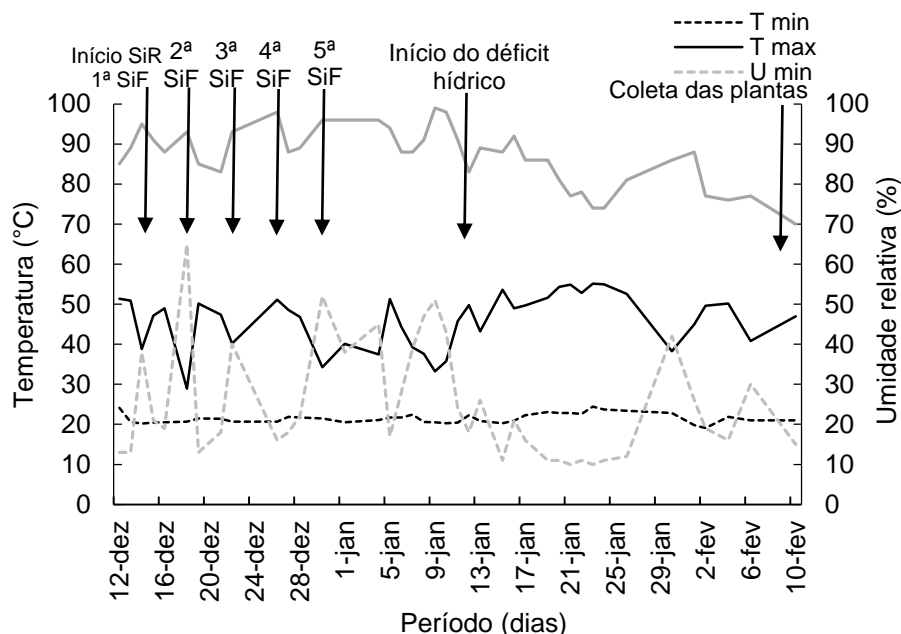
Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F, sendo os dados qualitativos comparados pelo teste de Tukey, e os quantitativos, pela análise de regressão polinomial, ambos com uma probabilidade de 5%, utilizando o software estatístico AgroEstat® (BARBOSA e MALDONADO JR., 2010).

## **3.2 Experimento 2: Silício em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar mitiga os efeitos do déficit hídrico após o transplântio**

### **3.2.1 Material vegetal e condições de crescimento**

O trabalho foi desenvolvido em casa de vegetação da UNESP Câmpus de Jaboticabal, no período de dezembro de 2017 a fevereiro de 2018. A variedade de cana-de-açúcar utilizada foi a CTC 4. O experimento foi desenvolvido em duas etapas na fase de formação da muda cultivada em vasos com substrato inerte (areia lavada), que recebeu os tratamentos com Si, e outra após o transplântio das mudas em vasos com amostras de um Latossolo Vermelho distrófico, que receberam os tratamentos com déficit hídrico.

As condições ambientais no interior da casa de vegetação foram registradas diariamente com auxílio de termoigrômetro (Figura 2).



**Figura 2.** Temperatura e umidade do ar máximas e mínimas no interior da casa de vegetação durante a execução do experimento. Setas indicam as datas de início do fornecimento de Si via radicular (SiR), das aplicações de Si via foliar (1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> SiF), início do déficit hídrico e coleta das plantas.

### 3.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados (DBC), com 6 repetições. Os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial 3x3, tendo o fornecimento de Si via solução nutritiva (radicular), pulverização foliar e mais o controle (ausência de Si), em três níveis de disponibilidade hídrica do solo (70, 50 e 30% da capacidade de retenção de água no solo – CRA).

Inicialmente, foi realizado o cultivo das MPBs, tendo uma muda de cana-de-açúcar por pote de plástico de 0,7 dm<sup>3</sup> preenchido com areia grossa lavada. O pote continha orifícios na parte de baixo, sendo acondicionado em bandeja de plástico, que recebeu a solução nutritiva. A solução nutritiva foi a de Hoagland e Arnon (1950), com alteração na fonte de ferro para Fe–EDDHMA, considerando o dobro da concentração recomendada, conforme indicação de Cavalcante et al. (2016). A concentração da solução nutritiva durante a primeira semana de cultivo foi mantida a 25%, e da segunda semana até o fim do experimento, a concentração foi elevada para 50%. O pH da solução foi mantido em 5,8±0,2 com o uso de solução de HCl ou NaOH, ambos a 1,0 M L<sup>-1</sup>.

A fonte de Si utilizada foi o silicato de sódio e o potássio estabilizado com sorbitol (113,4 g L<sup>-1</sup> de Si e 18,9 g L<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O). A definição da concentração de Si para uso na solução nutritiva seguiu a indicação amplamente utilizada nos ensaios com elemento, em diferentes culturas, de 2,0 mmol L<sup>-1</sup> (BARRETO et al., 2017). E para a pulverização foliar de Si, foram utilizados os resultados do experimento 1, que apresentou efeito quadrático das concentrações de Si (x) via pulverização foliar, na produção de massa seca da parte aérea (y) ( $y = -0,45x^{2**} + 3,063x + 7,65$ ; R<sup>2</sup> = 0,97), atingindo ponto de máximo na concentração de 3,4 mmol L<sup>-1</sup> de Si. Portanto, foi adotada essa concentração de Si para o tratamento via pulverização foliar nas MPBs.

O fornecimento do Si via radicular foi contínuo durante a fase de produção de mudas, sendo adicionado à solução nutritiva, e o da via pulverização foliar consistiu em cinco pulverizações, com intervalos de quatro dias (Figura 2), sendo aos 12; 16; 20; 24 e 28 dias após a emergência (DAE). O valor do pH da calda de pulverização foi mantido em 5,8±0,2. Foi realizado o equilíbrio da quantidade de potássio presente na fonte de Si nos tratamentos, utilizando uma solução de cloreto de potássio (KCl).

Após a fertilização com Si (aos 36 DAE), as mudas foram transplantadas para vaso de 7 dm<sup>3</sup> preenchidos com 5,5 dm<sup>3</sup> de amostras de um Latossolo Vermelho distrófico típico, A moderado, textura argilosa (ANDRIOLI e CENTURION, 1999), coletado do horizonte Ap, e as plantas, submetidas às condições de déficit hídrico, por um período de trinta dias.

Realizou-se a análise química para fins de fertilidade, conforme método descrito por Raij et al. (2001), tendo os seguintes resultados: pH CaCl<sub>2</sub>= 5; M.O=11 g dm<sup>-3</sup>; P res.= 11; S=18 mg dm<sup>-3</sup>; Ca= 11; Mg= 6; K= 1,9; Al= 0; H+Al= 20; SB (soma de bases)= 18,5; T (capacidade de troca catiônica)= 38,1 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; V=49%, m=0%. Determinou-se o teor de Si (3,0 mg dm<sup>-3</sup>), utilizando o método descrito por Korndörfer et al. (2004). A granulometria do solo foi de 540 g kg<sup>-1</sup> de areia, 380 g kg<sup>-1</sup> de argila e 90 g kg<sup>-1</sup> de silte.

Foi realizada aplicação de calcário (PRNT: 125; CaO: 48%; MgO: 16%) (0,285 g dm<sup>3</sup>), objetivando elevar a saturação por bases ( $V: [Ca^{+2}+Mg^{+2}+K^+]/[Ca^{+2}+Mg^{+2}+K^++H^++Al^{+3}] \times 100$ ) a 60%, sendo devidamente misturado no solo. O solo foi mantido úmido e após trinta dias da calagem, realizou-se a fertilização, aplicando 150 mg dm<sup>-3</sup> de N, P e K, na forma de sulfato de amônio,

superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente, e  $5 \text{ mg dm}^{-3}$  de Zn na forma de sulfato de zinco, todos misturados ao volume do solo.

No transplântio, as mudas possuíam seis folhas completamente desenvolvidas, sendo realizado um corte a 30 cm da base da última folha completamente desenvolvida, ou seja, 1/3 das folhas. Os níveis de disponibilidade hídrica do solo foram determinados a partir dos valores de microporosidade obtida pelo método da mesa de tensão com coluna de água de 60 cm de altura, considerando a densidade do solo, obtida pela relação entre a massa do solo seco em estufa a  $110^{\circ}\text{C}$ , por 24 horas, e o volume de amostra de solo indeformada (EMBRAPA, 1997).

A microporosidade total encontrada ( $0,3036 \text{ cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$ ) foi equivalente a 100% da CRA; no entanto, a condição de água considerada ideal foi de 70% desse valor por ser correspondente à demanda para a maioria das culturas. Os níveis de disponibilidade hídrica do solo foram definidos em: sem déficit (70% da CRA), déficit moderado (50% da CRA) e déficit severo (30% da CRA). O controle da disponibilidade hídrica foi realizado diariamente pelo método da pesagem dos vasos a partir da reposição da água evapotranspirada.

### **3.2.3 Análises realizadas**

#### **3.2.3.1 Rendimento quântico do FSII (Fv/Fm)**

A eficiência do fotossistema foi estimada pela medição da fluorescência da clorofila utilizando um fluorímetro de clorofila (Opti-sciences - Os30P). As plantas foram deixadas a adaptar-se no escuro durante um mínimo de 30 min antes da excitação do pulso de luz vermelha de 1 s.

Os seguintes parâmetros foram medidos: F0 (fluorescência mínima para excitação da clorofila) e Fm (fluorescência máxima para excitação da clorofila). Estes dois parâmetros foram usados para calcular Fv (variação na fluorescência calculada a partir de F0 e Fm), Fv/Fm (razão de fluorescência variável e fluorescência máxima), e Fv/F0 (razão de fluorescência variável e fluorescência mínima). As medidas foram realizadas entre 7 e 8 horas, usando a primeira folha completamente desenvolvida de cada planta (LICHTENTHALER et al., 2005).

### **3.2.3.2 Quantificação de clorofila e carotenoides**

Para a análise dos pigmentos, foram coletados dois discos foliares de 6 mg do terço médio do limbo foliar da primeira folha completamente desenvolvida, de acordo com a metodologia proposta por Lichtenthaler (1987), com leituras a 663 nm para a clorofila *a* (Chl *a*), 647 nm para a clorofila *b* (Chl *b*) e 470 nm para carotenoides, realizadas em espectrofotômetro de Beckman DU 640, sendo os teores definidos com base na massa fresca.

### **3.2.3.3 Índice de extravasamento de eletrólitos celulares**

Na avaliação dos danos à integridade das membranas celulares, foi utilizado o método da determinação do índice de extravasamento de eletrólitos, proposto por Dionisio-Sese e Tobita (1998), sendo coletados três discos foliares (129 mm<sup>2</sup> cada) da primeira folha completamente desenvolvida e emergidos em béquer contendo 20 mL de água deionizada, à temperatura ambiente, por 2 horas.

Após este período foi realizada uma leitura de condutividade elétrica da solução (EC<sub>1</sub>) com auxílio de um condutivímetro de bancada (Medidor digital TDS-3). Em seguida, as amostras foram submetidas a aquecimento em autoclave a 121°C, por 20 min, e após esfriamento foi realizado uma nova leitura de condutividade elétrica final (EC<sub>2</sub>). O extravasamento de eletrólitos foi determinado considerando a seguinte fórmula:  $EC_1/EC_2 \times 100$ .

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

O potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) foi determinado no terço médio do limbo foliar da primeira folha completamente desenvolvida, com auxílio de uma câmara de pressão de Scholander (Soil Moisture Equipment, EUA). A pressão foi aplicada até que ocorresse exsudação a partir do corte feito no pecíolo da folha. As medições foram avaliadas entre 6 e 9 horas (TURNER, 1981).

### **3.2.3.5 Conteúdo de prolina livre**

Os níveis de prolina livre foram determinados em amostras do limbo da terceira folha completamente desenvolvida, sendo imediatamente acondicionadas em nitrogênio líquido e armazenadas em freezer a -20°C. Seguidamente, foram pesados



500 mg do material, emacerado em nitrogênio líquido e adicionados 10 mL de ácido sulfossalicílico a 3%. A solução homogeneizada foi submetida a duas filtragens para a eliminação parcial dos interferentes e diluída com ácido ninhidrina diluída em ácido acético. Em um tubo de ensaio, foram colocados 2 mL do filtrado que reagiram com 2 mL de ácido ninhidrina e 2 mL de ácido acético glacial, por 60 minutos, em banho-maria, à temperatura de 100°C.

Decorrido este tempo, o tubo de ensaio foi colocado em um recipiente com gelo para finalizar a reação. Em seguida, foram adicionados 4 mL de tolueno (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>3</sub>), e a solução foi homogeneizada agitando-se por 15 a 20 segundos. A leitura de absorvância das amostras foi realizada em espectrofotômetro de Beckman DU 640, no comprimento de onda de 520 nm (BATES et al., 1973), sendo os teores definidos com base na massa fresca (FW) ( $\mu\text{mol g}^{-1}$  FW).

### **3.2.3.6 Conteúdo relativo de água**

O conteúdo relativo de água na folha foi determinado a partir da coleta de três discos foliares com aproximadamente 129 mm<sup>2</sup> da primeira folha completamente desenvolvida, sendo imediatamente pesado em balança analítica para a aferição da massa fresca do tecido (Pf). Após isso, as amostras foram reidratadas em água deionizada por 6 horas, para a obtenção da massa túrgida (Pst), fazendo-se uso de papel toalha para extrair o excesso de água. A massa seca (Ps) foi obtida após os discos permanecerem em estufa de circulação de ar forçada a 80°C, por 24 horas. Os valores do conteúdo relativo de água foram obtidos pela equação proposta por Barrs e Weatherley (1962):  $[(Pf - Ps)/(Pst - Ps)] \times 100$ .

### **3.2.3.7 Altura da planta, diâmetro do colmo e número de perfilhos**

Para a determinação da altura da planta, as medidas foram realizadas considerando o comprimento desde a base até o ápice da última folha. O diâmetro do colmo foi aferido utilizando paquímetro digital (Starrett®), com leituras a 5 cm da base da planta. O número de perfilhos da cana-de-açúcar foi obtido a partir da contagem.

### 3.2.3.8 Produção de massa seca

As plantas foram separadas em parte aérea e raízes, posteriormente lavadas em água corrente, 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 ( $65\pm 5^{\circ}\text{C}$ ), até atingir massa constante e obtida a massa seca de cada parte da planta.

### 3.2.3.9 Análise de silício (Si)

O conteúdo de Si na parte aérea foi determinado de acordo com a metodologia descrita por Kraska e Breitenbeck (2010), a qual consiste no método da digestão úmida, pela adição de peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) e hidróxido de sódio (NaOH), com a reação induzida em estufa a  $95^{\circ}\text{C}$ , pelo período de quatro horas. A determinação da concentração de silício foi realizada por espectrofotômetro a 410 nm, pelo método de colorimetria descrito por Korndörfer et al. (2004). Com base no teor e na massa seca, calculou-se o acúmulo do elemento na parte aérea das plantas.

### 3.2.4 Análise estatística

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância pelo teste F ( $p\leq 0,05$ ), e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, utilizando o software estatístico AgroEstat® (BARBOSA e MALDONADO JR., 2010).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Experimento 1

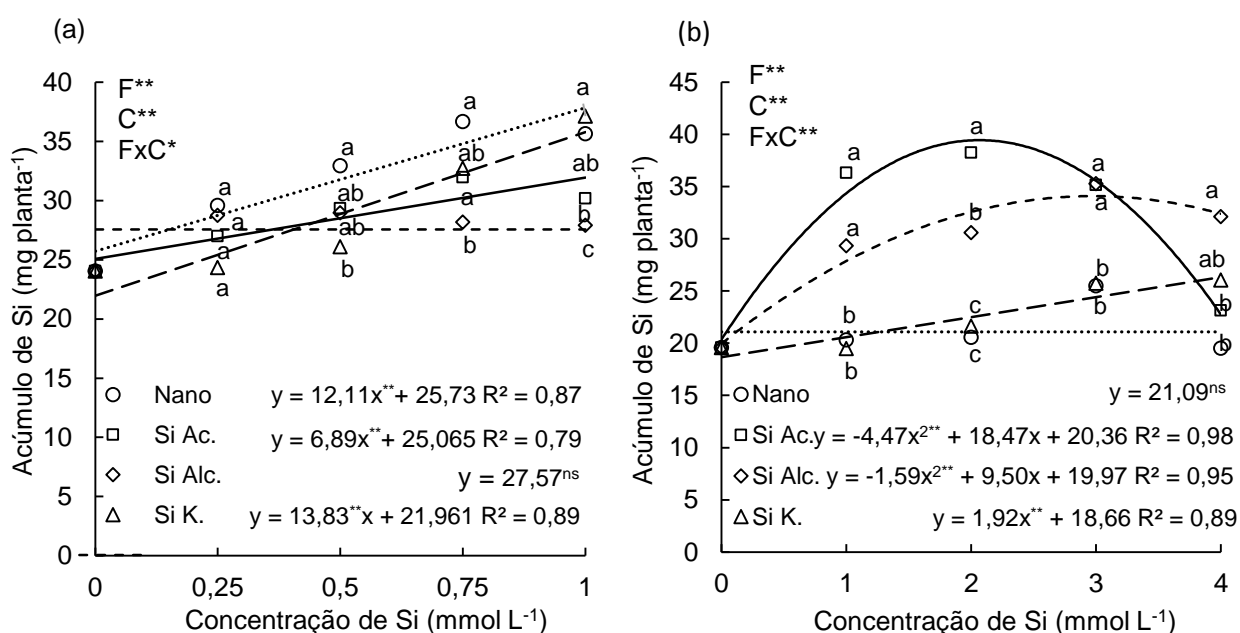
Os resultados obtidos com as pulverizações foliares nas mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar demonstram que houve efeito da interação entre as fontes de Si e as concentrações testadas para o acúmulo de Si (Figuras 3,b) e a massa seca da parte aérea ( $p<0,05$ ), em ambos os experimentos (Figuras 4a,b).

A aplicação de Si via pulverização foliar aumentou o acúmulo do elemento na parte aérea em relação às plantas não pulverizadas. No primeiro experimento, o acúmulo de Si na parte aérea aumentou progressivamente em função das concentrações utilizadas, com ajuste linear nas fontes Si K., Nano e Si Ac., com valores de 37,15; 35,64 e 30,19 mg por planta, respectivamente, em  $1,0 \text{ mmol L}^{-1}$ . Na

maior concentração, o valor de Si acumulado na fonte Nano foi igual ao Si K (Figura 3a).

O acúmulo de Si, no segundo experimento, ajustou-se ao modelo de regressão quadrática para as fontes Si Ac. e Si Alc., com pontos de máximo acúmulo de 39,45 e 34,10 mg por planta, nas concentrações de 2,07 e 2,97 mmol L<sup>-1</sup>, respectivamente. Na fonte Si K. o acúmulo foi crescente em função das concentrações, com o máximo de 26,04 mg por planta, em 4,0 mmol L<sup>-1</sup>. Para a Nano, não foi observado ajuste significativo na análise de regressão, sendo as concentrações testadas insuficientes para demonstrar um efeito da fonte no acúmulo do elemento (Figura 3b).

As fontes Si Ac. e Si Alc. apresentaram os maiores acúmulos de Si em relação às demais fontes, sendo iguais, exceto na concentração de 2 mmol L<sup>-1</sup> (Figura 3b), promovendo maior acúmulo em relação ao Si K., em todas as concentrações testadas.



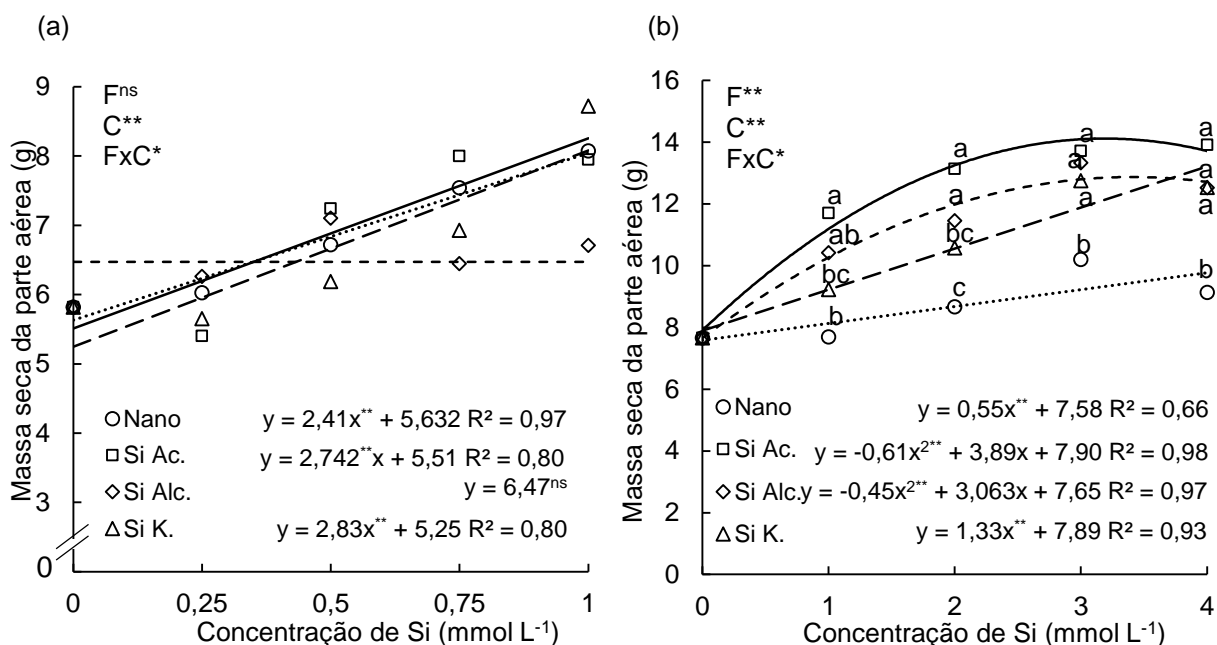
**Figura 3.** Acúmulo de Si na parte aérea em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob fontes (F): nanossilícica (Nano); ácido monossilícico estabilizado PEG-400 (Si Ac.); silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol (Si Alc.), e silicato de potássio (Si K.) e concentrações (C): 0; 0,25; 0,5; 0,75 e 1,0 mmol L<sup>-1</sup> (a) e 0; 1; 2; 3 e 4 mmol L<sup>-1</sup> (b) de Si aplicado via pulverização foliar. \*:significativo a 5% de probabilidade, \*\*: significativo a 1% de probabilidade, <sup>ns</sup>: não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre fontes, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

A massa seca da parte aérea foi incrementada pelo acúmulo de Si, sendo observado, no primeiro experimento, ajuste linear para as fontes Nano, Si Ac. e Si K.

Plantas que receberam a maior concentração de Si foliar tiveram aumento de até 30% na matéria seca em relação ao controle (0 mmol L<sup>-1</sup>). As concentrações testadas neste experimento não foram suficientes para expressar o efeito para a fonte Si Alc. (Figura 4a).

No segundo experimento, também foi observado reflexo positivo na massa seca da parte aérea com o acúmulo de Si, com ajuste quadrático para as fontes Si Ac. e Si Alc., com pontos de máximo em 14,11 e 12,87 g em 3,19 e 3,40 mmol L<sup>-1</sup>, respectivamente. As plantas que receberam aplicação das fontes Si K. e Nano responderam de forma linear com maior acúmulo de 12,54 e 9,14 g, respectivamente, de 4,0 mmol L<sup>-1</sup> (Figura 4b).

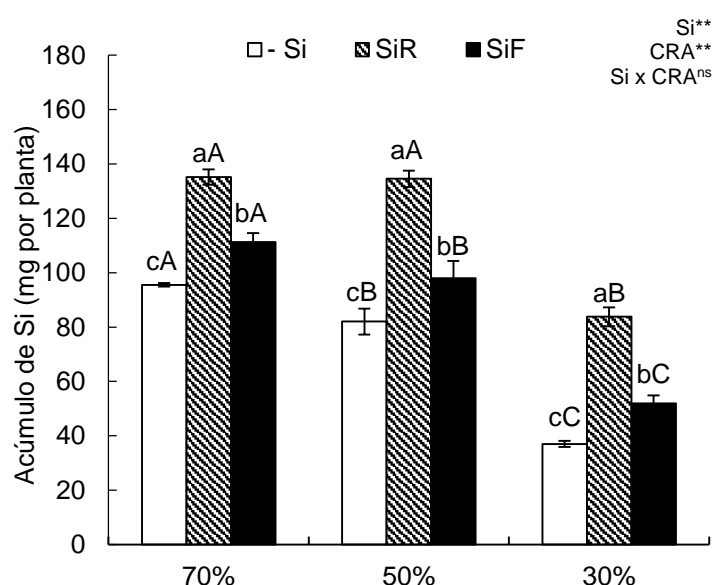
As fontes Si Ac. e Si Alc. apresentaram maiores valores referentes à massa seca nas menores concentrações (1 e 2 mmol L<sup>-1</sup>), sendo iguais entre si. E em maiores concentrações (3 e 4 mmol L<sup>-1</sup>), essas fontes proporcionaram incrementos de massa iguais aos observados em plantas que receberam pulverizações com o Si K (Figura 4b).



**Figura 4.** Massa seca da parte aérea em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob fontes (F): nanossílica (Nano); ácido monossilícico estabilizado PEG-400 (Si Ac.); silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol (Si Alc.), e silicato de potássio (Si K.) e concentrações (C): 0; 0,25; 0,5; 0,75 e 1,0 mmol L<sup>-1</sup> (a) e 0; 1; 2; 3 e 4 mmol L<sup>-1</sup> (b) de Si aplicado via pulverização foliar. \*: significativo a 5% de probabilidade, \*\*: significativo a 1% de probabilidade, <sup>ns</sup>: não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre fontes, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

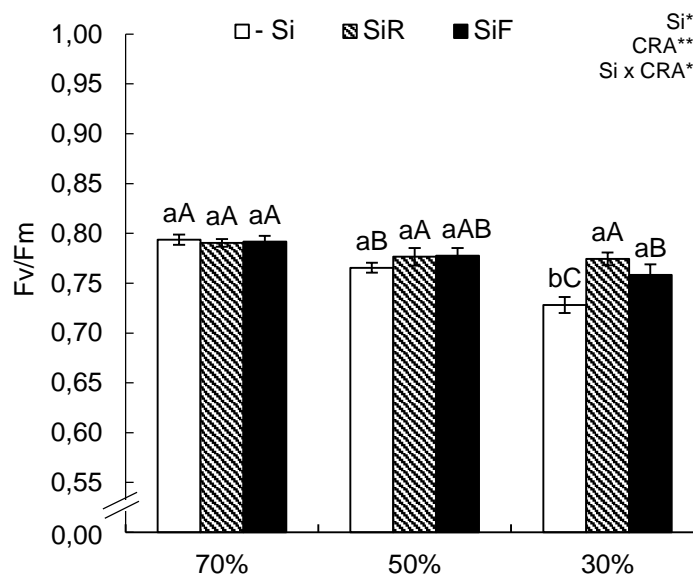
## 4.2 Experimento 2

Na ausência de Si, o aumento do déficit hídrico promoveu diminuição do acúmulo de Si, em relação ao tratamento sem déficit hídrico, tendo menor valor com a restrição hídrica severa (30% CRA). O fornecimento de Si via solução nutritiva aplicada no substrato promoveu maior acúmulo do elemento que a via pulverização foliar; no entanto, essa última forma de aplicação ainda foi suficiente para aumentar a quantidade acumulada de Si em relação ao tratamento-controle em todos os níveis de água (Figura 5).



**Figura 5.** Acúmulo de silício (Si) na parte aérea de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70; 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (Sem Si: -Si; Si radicular: SiR; Si foliar: SiF). \*\*: significativo a 1% de probabilidade e <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas demonstram diferenças em relação ao Si, e maiúsculas, em relação a CRA. As barras representam o erro padrão da média, n=6.

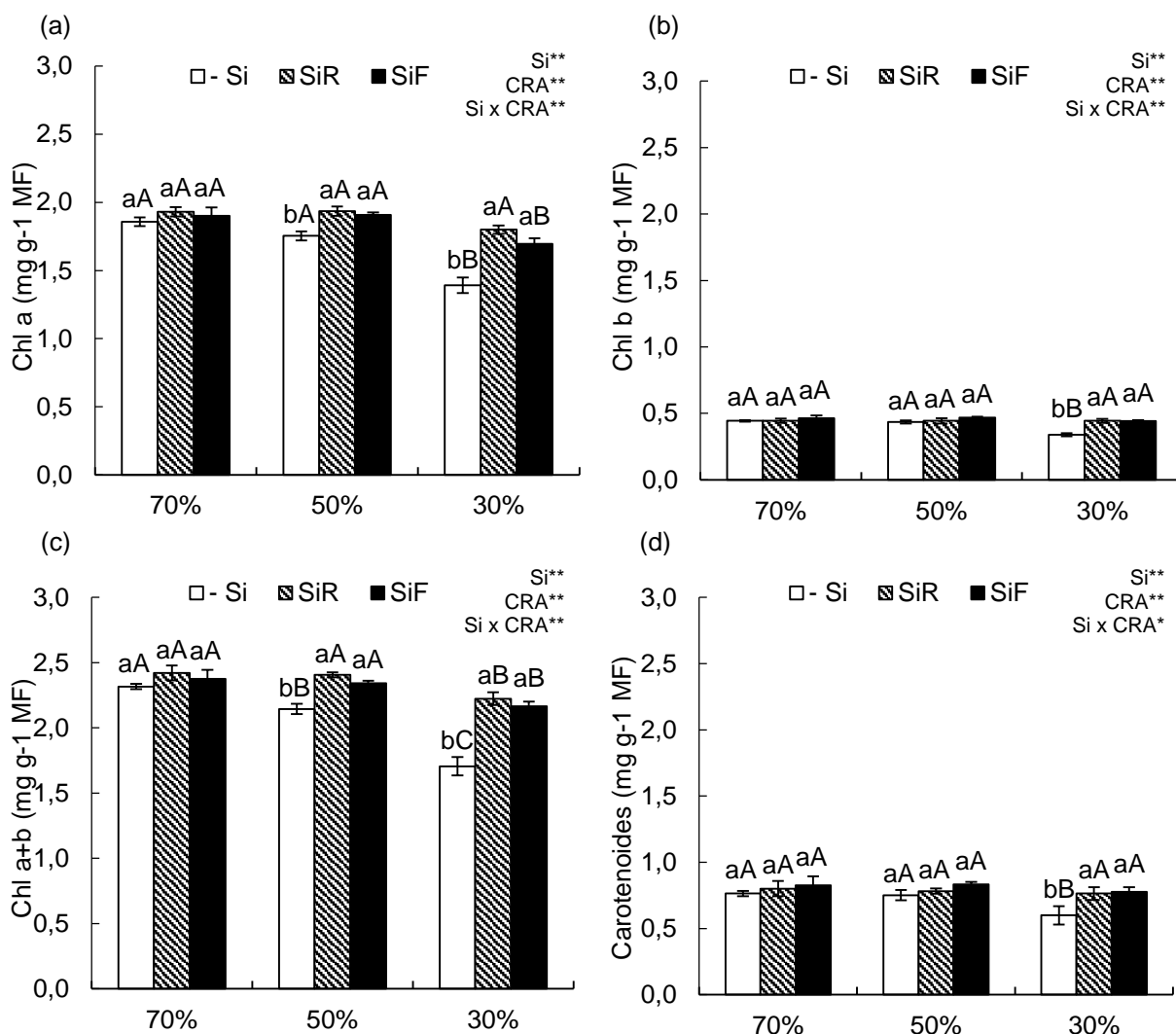
A eficiência quântica do FSII (Fv/Fm) em plantas que não receberam Si foi reduzida com o aumento da restrição hídrica, com menor valor em 30% CRA, em relação às plantas com umidade adequada (70% CRA). A presença de Si preservou a eficiência fotoquímica, tendo o Si fornecido por via solução nutritiva e via pulverização foliar maiores valores em relação ao controle (-Si), em severa restrição hídrica (30% CRA). O Si fornecido por via solução nutritiva manteve a eficiência fotoquímica constante em todas as condições de disponibilidade hídrica (Figura 6).



**Figura 6.** Eficiência quântica do FSII ( $F_v/F_m$ ) de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70; 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (Sem Si: -Si; Si radicular: SiR; Si foliar: SiF). \*\* e \*: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas demonstram diferenças em relação ao Si, e maiúsculas, em relação a CRA. As barras representam o erro padrão da média,  $n=6$ .

Na ausência de Si, houve diminuição da Chla, *b* e *a+b* na condição de déficit hídrico severo em relação ao tratamento sem déficit. O fornecimento de Si nas duas formas de aplicação aumentou a quantidade de Chla e *a+b* nas plantas sob déficit hídrico moderado e severo, e a Chlb apenas na condição de déficit hídrico severo (Figura 7a, b, c).

A quantidade de carotenoides nas folhas das plantas, sem aplicação de Si, também foi diminuída com a redução da disponibilidade de água no solo, principalmente em déficit hídrico severo (30% CRA). Apenas no déficit hídrico severo o fornecimento de Si, de forma semelhante em ambos os modos de aplicação, incrementou o conteúdo de carotenoides foliares (Figura 7d).

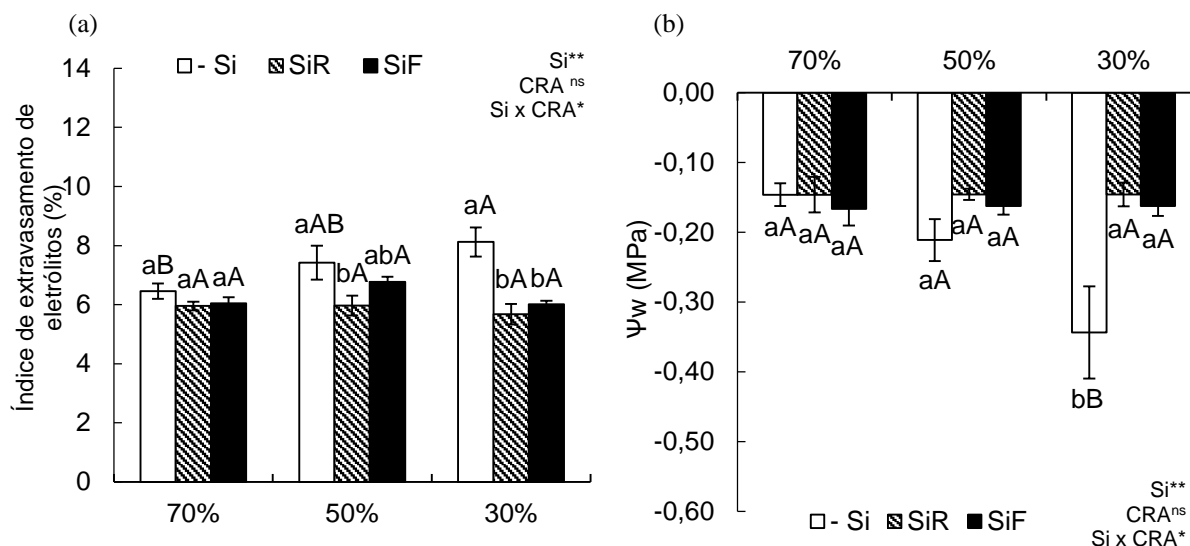


**Figura 7.** Clorofila a (Chl a) (a), clorofila b (Chl b) (b), clorofila a+b (Chl a+b) (c) e carotenoides (d) de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70; 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (Sem Si: -Si; Si radicular: SiR; Si foliar: SiF). \*\* e \*: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas demonstram diferenças em relação ao Si, e maiúsculas, em relação a CRA. As barras representam o erro padrão da média, n=6.

O índice de extravasamento de eletrólitos celulares, sem aplicação de Si, aumentou com os níveis de restrição de água no solo. Com o fornecimento de Si, tanto por via solução nutritiva como por pulverização foliar, as plantas tiveram índices inferiores em relação ao controle (-Si) em déficit hídrico moderado e severo (Figura 8a).

Na ausência de Si, o potencial hídrico foliar reduziu-se com o aumento do nível de déficit hídrico, com menor valor em déficit hídrico severo (30% CRA). A nutrição

com Si previamente ao transplântio, em ambas as formas de fornecimento, manteve o potencial hídrico foliar maior em relação ao controle (-Si), em plantas submetidas a restrição severa de água (30% CRA) (Figura 8b).

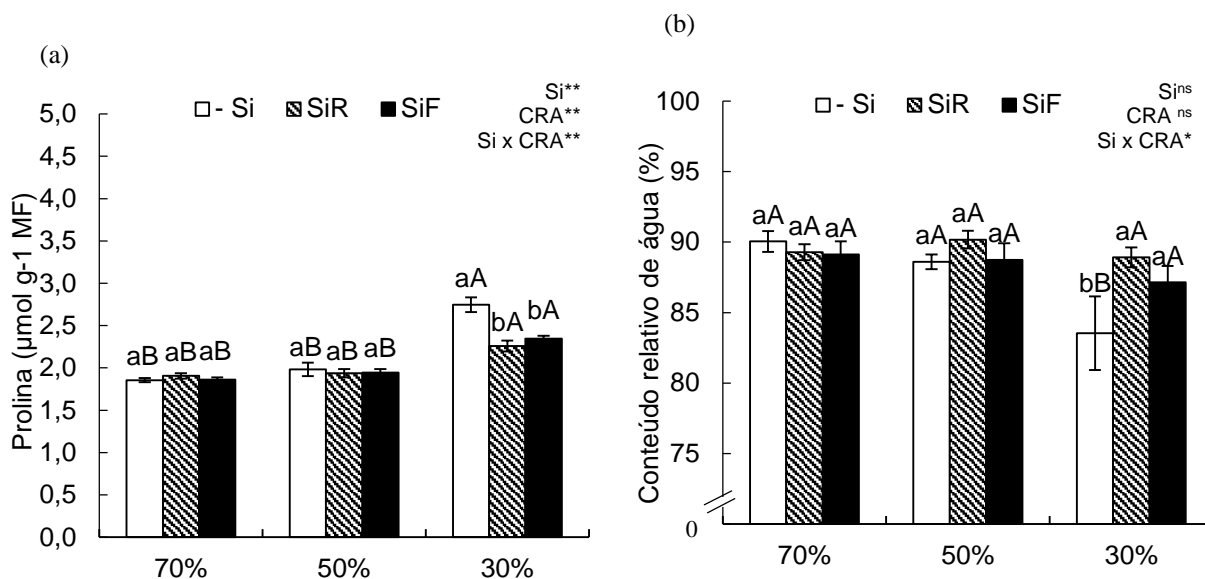


**Figura 8.** Índice de extravasamento de eletrólitos (a) e potencial hídrico foliar ( $\Psi_p$ ) (b) de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70; 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (Sem Si: -Si; Si radicular: SiR; Si foliar: SiF). \*\* e \*: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas demonstram diferenças em relação ao Si, e maiúsculas, em relação a CRA. As barras representam o erro padrão da média, n=6.

A quantidade de prolina livre aumentou na restrição hídrica severa, sobretudo em plantas que não receberam Si antes do transplântio. No entanto, em déficit hídrico severo, o fornecimento de Si via solução nutritiva e pulverização foliar, diminuiu o conteúdo de prolina livre no tecido foliar (Figura 9a).

O conteúdo relativo de água, em plantas não fertilizadas com Si em déficit hídrico severo, reduziu em mais de 7% o teor de água no tecido foliar, em relação à condição de água adequada. Com o fornecimento de Si, por via solução nutritiva ou por pulverização foliar em déficit hídrico severo, a quantidade de água foi maior em relação ao controle (-Si), sendo inclusive igual ao tratamento sem déficit hídrico (Figura 9b).



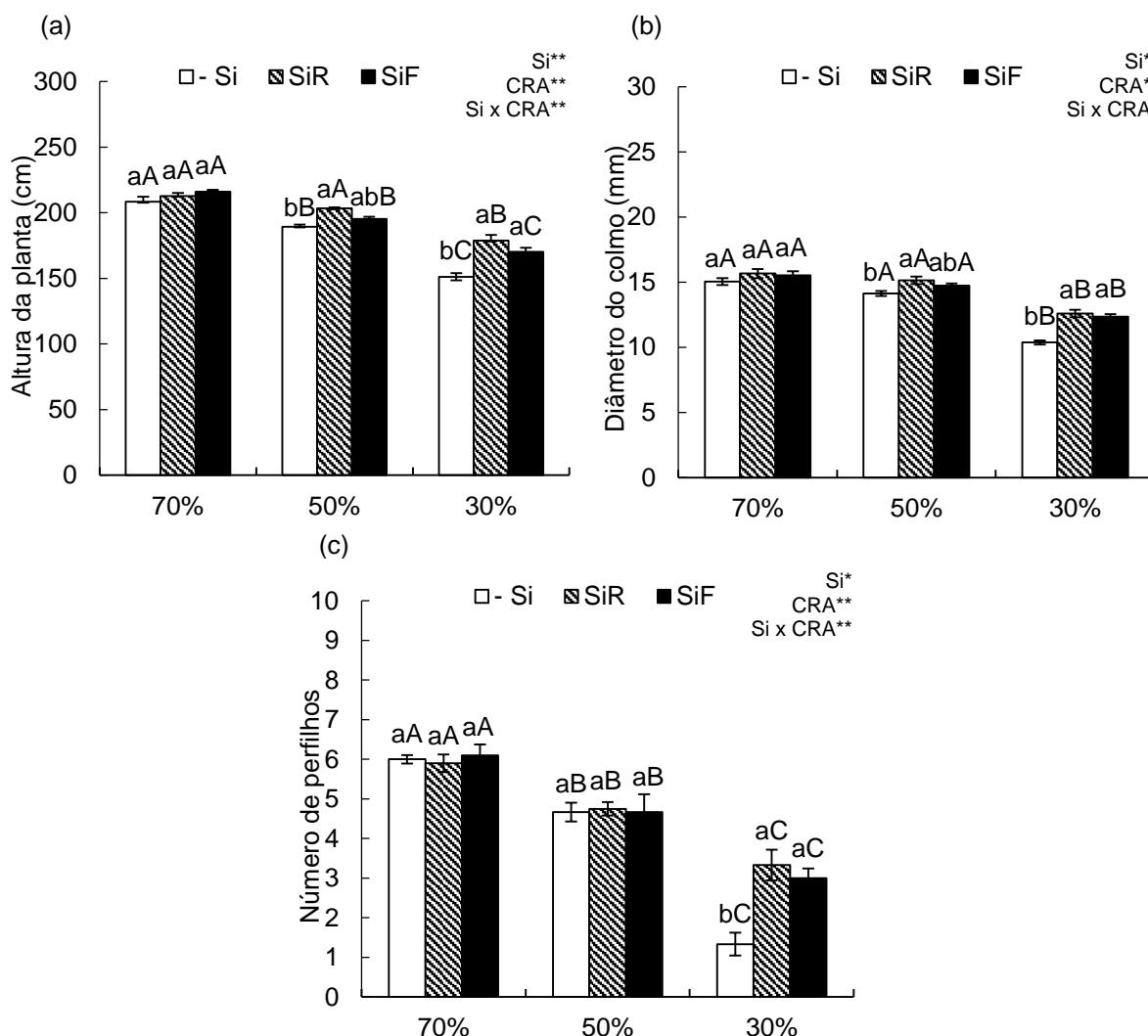


**Figura 9.** Prolina livre (a) e conteúdo relativo de água (b) de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70; 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (Sem Si: -Si; Si radicular: SiR; Si foliar: SiF). \*\* e \*: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas demonstram diferenças em relação ao Si, e maiúsculas, em relação a CRA. As barras representam o erro padrão da média, n=6.

Os níveis de disponibilidade de água no solo reduziram a estatura das plantas. A presença de Si aumentou a altura das plantas em déficit hídrico moderado e severo com o Si fornecido via solução nutritiva, e apenas em déficit hídrico severo com a pulverização foliar (Figura 10a).

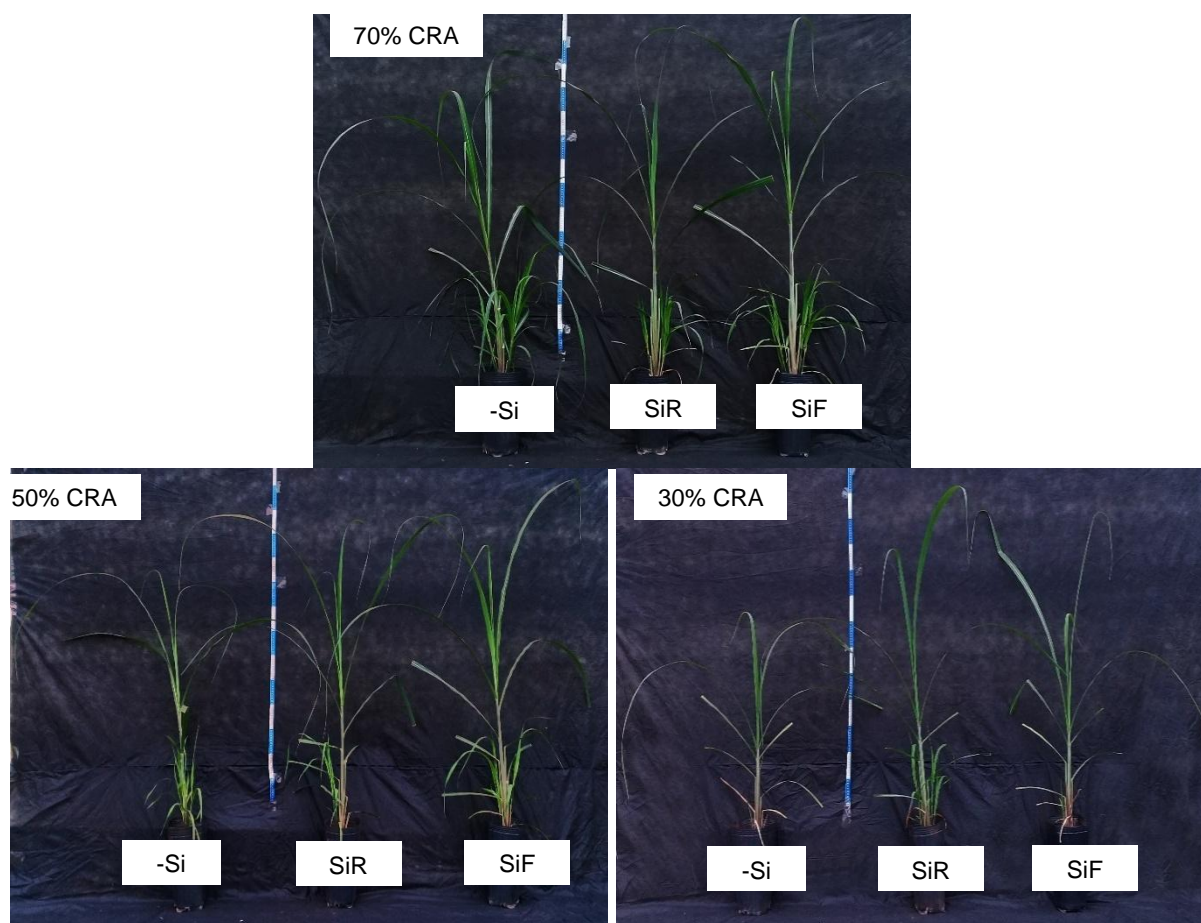
Em plantas que não receberam Si na fase de produção de mudas, o diâmetro do colmo foi reduzido com o aumento da restrição de água no solo, sendo esse efeito mais acentuado na condição de déficit hídrico severo (30% CRA). Em déficit hídrico severo, o fornecimento de Si, em ambas as formas de aplicação, aumentou o diâmetro do colmo em relação ao controle (-Si) (Figura 10b).

O número de perfilhos foi reduzido com o aumento dos níveis de restrição hídrica; e apenas em déficit hídrico severo, a presença do Si incrementou o número de perfilhos em até 60 e 51% com o fornecimento via solução nutritiva e pulverização foliar, respectivamente, em relação às plantas que não receberam Si previamente ao transplante (Figura 10c).



**Figura 10.** Altura da planta (a), diâmetro do colmo (b) e número de perfílios (c) de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70; 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (Sem Si: -Si; Si radicular: SiR; Si foliar: SiF). \*\* e \*: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas demonstram diferenças em relação ao Si, e maiúsculas, em relação a CRA. As barras representam o erro padrão da média, n=6.

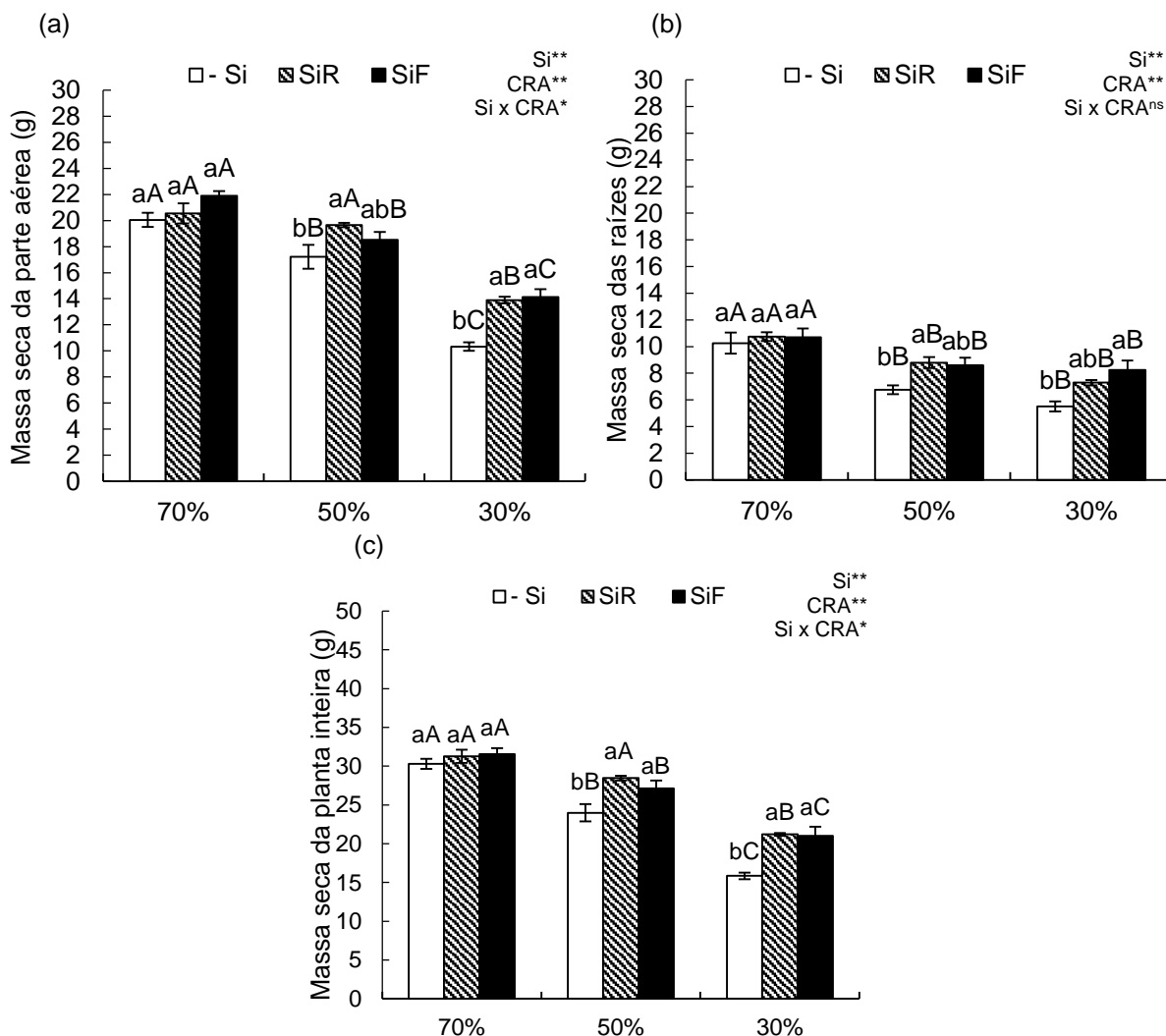
Plantas que não receberam Si na fase de produção de mudas tiveram redução da matéria seca da parte aérea e da planta inteira, em função do aumento do déficit hídrico, sobretudo em déficit hídrico severo (30% CRA) (Figura 12a, c), sendo possível de ser observada visualmente no crescimento das plantas que não receberam Si (-Si) (Figura 11).



**Figura 11.** Efeito do fornecimento de Si no crescimento pós transplântio de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70; 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (Sem Si: -Si; Si radicular: SiR; Si foliar: SiF).

Na massa seca da planta inteira, as reduções foram de até 47 e 21%, em condições de déficit hídrico severo e moderado, respectivamente, em relação à condição de hidratação adequada (Figura 12c).

Tanto em déficit hídrico moderado quanto em severo, a presença do Si contribuiu para a manutenção da massa seca da parte aérea das raízes e da planta inteira. E mesmo havendo redução no acúmulo de massa seca na condição de 30% de CRA, a presença do Si fornecido por via solução nutritiva ou por pulverizações foliares, foi suficiente para mitigar os danos causados pelo déficit hídrico e reduzir as perdas no acúmulo de biomassa (Figura 12a, b, c).



**Figura 12.** Massa seca da parte aérea (a), massa seca da raiz (b) e massa seca da planta inteira (c) de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70; 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (Sem Si: -Si; Si radicular: SiR; Si foliar: SiF). \*\* e \*: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas demonstram diferenças em relação ao Si, e maiúsculas, em relação a CRA. As barras representam o erro padrão da média, n=6.

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1 Experimento 1

A pulverização foliar foi suficiente em incrementar a absorção do elemento pelas plantas de cana-de-açúcar na fase de formação das mudas, especialmente com emprego das fontes Si Ac. e Si Alc (Figura 3). Isso ocorre devido à ação dos estabilizantes pelas suas propriedades umectantes que aumenta a permanência da

gota na superfície foliar (BABIKER e DUNCAN, 1974; D'SOUZA e SHEGOKAR, 2016), diminuindo a velocidade de polimerização do Si, favorecendo sua absorção por prolongar o tempo de contato da gota com a superfície foliar.

As baixas concentrações, aliadas à alta frequência de aplicação, também beneficiaram a absorção de Si, pois a polimerização somente inicia em solução com concentração de Si acima de 3 mmol L<sup>-1</sup> (BIRCHALL, 1995). Desse modo, é possível afirmar que grande parte do elemento que teve contato direto com a folha na aplicação foliar tenha sido absorvido pela parte aérea, pela baixa polimerização do produto.

O acúmulo de Si refletiu, positivamente, na produção de biomassa (Figura 4), demonstrando que a pulverização foliar de Si, na fase de formação de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar, pode melhorar o crescimento e aumentar a tolerância das mudas a possíveis danos causados por estresses de natureza biótica ou abiótica.

O crescimento das MPBs pulverizadas com Si foi maior que as do tratamento controle (0 mmol L<sup>-1</sup>), e o aumento da massa seca pode ser devido à deposição de Si nos tecidos vegetais, tornando o caule mais ereto, melhorando a arquitetura da planta e a captação de radiação solar pela superfície das folhas. Acredita-se que uma melhoria na arquitetura da planta pode resultar em maior atividade na biossíntese dos pigmentos fotossintéticos devido à maior excitação dos centros ativos pela exposição da área foliar à luz, tanto pela maior atividade fotoquímica quanto por retardar sua deterioração oxidativa (STREIT et al., 2005).

Melhorias na atividade fotossintética, favorecida pela modificação na arquitetura da planta pelo efeito do Si, já foram relatadas anteriormente em culturas como o milho (ROHANIPOOR et al., 2013), o arroz (JAWAHAR e VAIYAPURI, 2010) e a cana-de-açúcar (JAIN et al., 2016) após aplicação de Si via solo, resultando em ganhos de massa seca.

Neste trabalho obtiveram-se respostas semelhantes, utilizando menor quantidade de Si, demonstrando que o uso de fontes mais estáveis, associadas a baixas concentrações e alta frequência de aplicação podem ser alternativas para melhorar a eficiência das pulverizações com Si.

## 5.2 Experimento 2

O déficit hídrico é um dos principais estresses ambientais que afetam o crescimento e a produtividade da cana-de-açúcar em muitas áreas de clima tropical e subtropical (JAIN et al., 2015). Observou-se, no presente estudo, que o prejuízo do déficit hídrico nas plantas de cana-de-açúcar iniciou com déficit hídrico moderado, sendo agravado com o severo, especialmente nas variáveis: eficiência quântica do FSII, na *Chl b* e carotenoides, no potencial hídrico foliar, prolina livre, conteúdo relativo de água e no número de perfilhos.

Esses resultados evidenciam que o déficit hídrico moderado (50%) e severo (30%) foram suficientes para demonstrar que as MPBs são sensíveis ao déficit hídrico durante os trinta dias iniciais do transplante para o solo. O efeito prejudicial do déficit hídrico imediato, com supressão de água por um período de 72 horas nas variáveis fisiológicas e de crescimento, também foi relatado na fase inicial de crescimento da cana-de-açúcar, mas em mudas oriundas do sistema convencional que usam toletes grandes (JAIN et al., 2015), não havendo relatos em mudas provindo de microtoletes (MPB).

Ficou evidenciado que a aplicação de Si, nas duas formas de fornecimento nas MPBs, foi eficiente para aumentar o acúmulo do elemento na parte aérea em todos os níveis de água do solo (Figura 5). O maior acúmulo de Si nas plantas que receberam o elemento via solução nutritiva, em relação à pulverização foliar, independentemente dos níveis de água no solo, pode ser justificado por o fornecimento ter sido contínuo durante toda a fase de produção das mudas. Soma-se a isso, o fato de que, gramíneas apresentam alto acúmulo de Si, pois possuem transportadores específicos (*ZmLsi1* e *ZmLsi6*) (MITANI et al., 2008).

No entanto, houve acréscimo na absorção de Si pelas plantas com a pulverização foliar do elemento em relação às plantas-controle. Isso ocorreu, devido à qualidade da calda pulverizada nas folhas, tendo possível baixa taxa de polimerização, dada a concentração de Si utilizada ( $3,4 \text{ mmol L}^{-1}$ ) e a presença de estabilizante (sorbitol), contribuindo para garantir incremento da absorção do elemento pelas folhas das MPBs.

O declínio da relação  $F_v/F_m$  é um importante indicativo do dano fotoinibitório de centros de reação do FSII em plantas sujeitas a estresses do ambiente (SILVA et

al., 2012). As MPBs enriquecidas de Si nos tecidos, quando submetidas ao déficit hídrico severo no transplântio para o solo, promoveram aumento dos valores da fluorescência do FSII em relação às plantas-controle (Figura 6). Isso indica que maior parte da radiação solar, possivelmente, estivesse sendo utilizada na fase fotoquímica da fotossíntese, não havendo, portanto, comprometimento do PSII em virtude da disponibilidade hídrica (SILVA et al., 2012).

Acrescenta-se ainda que as plantas que receberam Si via solução nutritiva, mantiveram valores semelhantes de  $F_v/F_m$  com ou sem déficit hídrico, podendo indicar alta eficiência no uso da radiação, possivelmente pelo efeito deste elemento nas reações de assimilação de carbono (LIANG et al., 2015) e pela maior atividade de absorção e da transferência de luz dos pigmentos fotossintéticos (HERMANS et al., 2004).

O efeito benéfico do Si nas duas formas de aplicação, no aumento dos pigmentos fotossintéticos ( $Chl_a$ ,  $b$  e  $a+b$ ) e no teor de carotenoides, ficou evidente nas plantas sob déficit hídrico, especialmente o severo (Figura 7a, b, c, d). Esse efeito do Si ocorreu pela redução do estresse verificado pelo menor índice de extravasamento de eletrólitos, mediado pelo elemento benéfico nas duas formas de aplicação (Figura 8a). Esse fato ocorre porque esse índice possui forte correlação com a produção de peróxido de hidrogênio, um subproduto da peroxidação lipídica (BARRETO et al., 2017), ou seja, o Si reduziu os danos provocados pelo déficit hídrico, proporcionando maior integridade física às membranas celulares.

Portanto, essa preservação do teor de clorofila nas plantas estressadas, possivelmente, deve-se ao papel do Si na ação enzimática que diminui os danos provocados pelo estresse oxidativo (GONG et al., 2005) e pelo aumento da quantidade de carotenoides, garantindo maior transferência de energia luminosa para as clorofilas e também favorecendo na proteção das plantas à condição de estresse (TAIZ et al., 2017). A maior eficiência no uso da luz pelo aumento da quantidade de pigmentos fotossintéticos, em cana-de-açúcar sob déficit hídrico, foi anteriormente observada pela aplicação de Si via solo (BOKHTIAR et al., 2012).

O potencial hídrico foliar pode ser reduzido pela baixa disponibilidade de água no solo, resultando na diminuição do volume celular. O controle do potencial de água nas folhas pela presença de Si, nas duas formas de aplicação, em plantas sob déficit

hídrico severo (Figura 8b), pode ser atribuído ao efeito na manutenção do volume de água no tecido foliar e na formação de uma barreira física à perda de água pela deposição de cristais de sílica no tecido epidérmico (PEI et al., 2010). O efeito do Si aplicado via solo, no aumento do potencial hídrico foliar, em plantas sob déficit hídrico, também foi observado em milho, com 60% de CRA (AMIN et al., 2014).

O Si induziu menor perda foliar de água devido a uma possível redução na tensão da solução do xilema, que é transmitida através das colunas contínuas de água até às raízes (MARCOS et al., 2018), o que, por sua vez, pode ter refletido no equilíbrio do potencial hídrico na folha. O efeito do Si no aumento do potencial hídrico resultou em maior conteúdo de água em mudas de trigo (GONG et al., 2003).

O efeito mitigador do Si nos danos provocados pelo déficit hídrico da planta, ao aumentar o conteúdo de água foliar em déficit hídrico severo (Figura 9b), também pode ter ocorrido pela maior proteção na atividade de proteínas que contribuem na absorção de água, como as aquaporinas (VANDELEUR et al., 2009), aumentando a quantidade de água, tanto pela facilidade de absorção quanto pela diminuição das perdas (LIU et al., 2014; 2015). Portanto, esse aumento das aquaporinas nas plantas pode ter ocorrido pelo fato da diminuição do teor de prolina foliar (Figura 9a), pois a mesma pode ser utilizada para a síntese de proteínas (ESTESAMI e JEONG, 2018).

O aumento da concentração de prolina é uma resposta comum das plantas às tensões ambientais, pois nestas condições ocorre superprodução de diferentes tipos de orgânicos compatíveis solutos, que são de baixo peso molecular e altamente solúveis (PEI et al., 2010). Neste trabalho, os resultados apoiam a visão de que o acúmulo de prolina sob estresse é um sintoma de lesão, e a diminuição induzida pelo Si no acúmulo de prolina foi um sinal de alívio das lesões provocadas pelo déficit hídrico, pois o nitrogênio acumulado pode ser incorporado em outros compostos orgânicos.

A redução dos danos causados pelo déficit hídrico nas plantas de cana-de-açúcar cultivadas especialmente sob déficit hídrico severo, promovido pelo efeito benéfico do Si fornecido por via solução nutritiva e pulverização foliar, dadas as variáveis fisiológicas, favoreceu as variáveis de crescimento analisadas (Figura 10a, b, c) e refletiu na produção de massa seca da parte aérea e da planta inteira (Figura 12a, c).



Na condição de déficit hídrico moderado (50% CRA), houve o maior desempenho do Si, especialmente fornecido via solução nutritiva, conseguindo manter o diâmetro do colmo, a altura, a massa seca da parte aérea e da planta inteira, semelhantemente às plantas sem estresse (70% CRA), fato que não ocorreu em déficit hídrico severo (Figuras 10 e 11). Isso indica a importância do Si na melhoria das variáveis de crescimento da planta fornecido via solução nutritiva para MPB, em condição de déficit moderado em relação ao déficit severo.

Embora não haja relatos deste efeito benéfico do Si nas MPBs e seus efeitos imediatos nas plantas sob déficit hídrico, durante o transplântio, existem indicações em outras situações na cultura da cana-de-açúcar. O fornecimento de Si via solo proporcionou maior produção de biomassa em cana-de-açúcar, após um período de 60 dias sob 55% de CRA (CAMARGO et al., 2017).

Apesar de o acúmulo de Si obtido pela pulverização foliar ter sido menor que o obtido por via solução nutritiva, o efeito do elemento, em condição de déficit hídrico severo, foi semelhante em ambas as formas de aplicação verificada nas variáveis fisiológicas (Figuras 8 e 9) (Fig. 4a, b, c, d), de crescimento (Figura 10a, b, c) e de massa seca (Figura 12a, c). Esse efeito pode ser justificado pelo fato de que a pulverização foliar de Si foi eficiente para garantir aumento de seu acúmulo na parte aérea da planta e, conseqüentemente, seu efeito mitigador (MA et al., 2011), dada a alta frequência das aplicações foliares e com concentração adequada do elemento.

## 5 CONCLUSÃO

O fornecimento de Si via pulverização foliar aumentou o acúmulo de elemento na parte aérea e a produção de massa seca, destacando-se as fontes de Si com estabilizante em relação ao silicato de potássio.

As concentrações testadas foram suficientes para atingir máximo acúmulo de massa seca da parte aérea nas fontes ácido monossilícico estabilizado com PEG-400 e silicato de sódio e de potássio estabilizado com sorbitol, nas concentrações de 3,19 e 3,40 mmol L<sup>-1</sup>, respectivamente.

Na ausência de Si, o déficit hídrico prejudicou as variáveis fisiológicas, de crescimento e a produção de massa seca das plantas.

O fornecimento de Si, via solução nutritiva, destacou-se da via pulverização foliar, na formação das mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar por ser mais eficiente em reduzir danos causados pelo déficit hídrico, nos primeiros trinta dias após o transplante.

O Si via solução nutritiva foi importante durante a formação das mudas pré-brotadas e transplantadas em solo sob déficit hídrico por aumentar a eficiência quântica do fotossistema II, o teor de clorofila, o potencial hídrico foliar, o conteúdo de água e por diminuir o extravasamento de eletrólitos celulares, o conteúdo de prolina livre e por permitir o maior crescimento e produção de biomassa da planta.

## 6 REFERÊNCIAS

Almeida, S.M., Santos, C., Labate, C., Guidetti, G.S., Santana, B.J., Ferreira, I.C., Delima, R.O., Fritsche, N.R., 2012. Breeding for water use efficiency. In: Fritsche-Neto, R., Borém A. (eds) Plant breeding for abiotic stress tolerance. **Springer**, p.87–102.

Amin, M., Ahmad, R., Basra, S.M.A., Murtaza, G., 2014. Silicon induced improvement in morpho-physiological traits of maize (*Zea mays* L.) under water deficit. **Pakistan Journal of Agricultural Science**, v.51, p.187-196.

Andrioli, I., Centurion, J.F. Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 27, Brasília, 1999. Anais. Brasília, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999, 32p.

Babiker, A.G.T., Duncan, H. J., 1974. Penetration of bracken fronds by asulam as influenced by the addition of surfactant to the spray solution and by pH. **Weed Research**, v.14, p.375-378.

Barbosa, J.C., Maldonado Júnior, W., 2010. **AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos**. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp.

Barrs, H.D., Weatherley, P.E., 1962. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. **Australian Journal of Biological Sciences**, v.15, p.413-428.

Barreto, R.F., Schiavon Júnior, A.A., Maggio, M.A., Prado, R.M., 2017. Silicon alleviates ammonium toxicity in cauliflower and in broccoli. **Scientia Horticulturae**, v. 225, p.743–750.

Bates, L.S., Waldren, R.P., Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. **Plant and Soil**, v.39, p.205-207.

Bernardo, S. Manejo da irrigação na cana-de-açúcar, 2006. **Alcoolbrás**, São Paulo, n.106, p.72-80.

Birchall, J.D., 1995. The essentiality of silicon in biology. **Chemical Society Reviews**, v.24, p.351-357.

Bokhtiar, S.M., Huang, H-R., Li, Y-R, Dalvi, V.A., 2012. Effects of silicon on yield contributing parameters and its accumulation in abaxial epidermis of sugarcane leaf blades using energy dispersive x-ray analysis. **Journal of Plant Nutrition**, v.35, p.1255-1275.

Camargo, M.S., Bezerra, B.K.L., Vitti, A.C., Silva, M.A., Oliveira, A.L., 2017. Silicon fertilization reduces the deleterious effects of water deficit in sugarcane. **Journal of soil Science and Plant Nutrition**, v.17, p.99-111.

Camargo, M.S., Rocha, G., Korndörfer, G.H., 2013. Silicate fertilization of tropical soils: silicon availability and recovery index of sugar cane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.602–612.

Carlin, S.D., Santos, D.M.M., 2009. Indicadores fisiológicos da interação entre déficit hídrico e acidez do solo em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.1106-1113.

Cavalcante, V.S., Prado, R.M., Vasconcelos, R.V., Campos, C.N.S., 2016. Iron concentrations in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) cultivated in nutrient solution. **Agrociência**, v.50, p.867-875.

CONAB. Acompanhamento de safra brasileira de cana-de-açúcar, v.4 – Safra 2017/18, n.4 - Quarto levantamento, Brasília p.1-73, abril/2018.

D'Souza, A.A., Shegokar, R., 2016. Polyethylene glycol (PEG): a versatile polymer for pharmaceutical applications. **Expert Opinion on Drug Delivery**, v.9, p.1257-1275.

Dionisio-Sese, M.L., Tobita, S., 1998. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science**, v.135, p.1-9.

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997). **Manual de métodos de análise de solo**. segunda ed. Rio de Janeiro, p. 23-24.

Epstein, E. Silicon: its manifold roles in plants, 2009. **Annals of Applied Biology**, v.155, p.155-160.

Estesami, H., Jeong, B.R., 2018. Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.147, p.881–896.

Farooq, M.A., Dietz, Karl-Josef., 2015. Silicon as versatile player in plant and human biology: overlooked and poorly understood. **Frontiers in Plant Science**, v.6, art.994.

Gírio, L.A.S., Dias, F.L.F., Reis, V.M., Urquiaga, S., Schultz, N., Bolonhezi, D., Mutton, M.A., 2015. Bactérias promotoras de crescimento e adubação nitrogenada no crescimento inicial de cana-de-açúcar proveniente de mudas pré-brotadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, p.33-43.

Gong, H., Chen, K., Chen, G., Wang, S., Zhang, C., 2003. Effects of silicon on growth of wheat under drought. **Journal of Plant Nutrition**, v.26, p.1055-1063.

Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S., Zhang, C. 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v.169, p.313-321.

Hattori, T., Inanaga, S., Araki, H., Na, P., Morita, S., Luxová, M., Lux, A., 2005. Application of silicon enhanced drought tolerance in Sorghum bicolor. **Physiologia Plantarum**, v.123, p.459–466.

Hattori, T., Inanaga, S., Tanimoto, E., Lux, A., Luxova, M., Sugimoto, Y., 2003. Silicon-induced changes in viscoelastic properties of sorghum root cell walls. **Plant and Cell Physiology**, v.44, p.743–749.

Hermans, C., Johnson, G.N., Strasser, R.J., Verbruggen, N., 2004. Physiological characterisation of magnesium deficiency in sugar beet: Acclimation to low magnesium differentially affects photosystems I and II. **Planta**, v.220, p.344–355.

Hoagland, D.R., Arnon, D.L., 1950. The water culture methods for growing plants without soil. **Circular**, v.347, p.32.

Jain, R., Chandra, A., Venugopalan, V.K., Solomon, S., 2015. Physiological changes and Expression of SOD and P5CS genes in response to water deficit in sugarcane. **Sugar Tech**, v.17, p.276–282.

Jain, R., Singh, S.P., Singh, A., Singh, S., Tripathi, P., Kishor, R., Jain, N., Shukla, S.K., Chandra, A., Solomon, S., 2016. Changes in growth, yield, juice quality and biochemical attributes of sugarcane in response to orthosilicic acid granules. **Sugar Tech**.

Jawahar, S., Vaiyapuri, V., 2010. Effect of sulphur and silicon fertilization on growth and yield of rice. **International Journal of Current Research**, v.9, p.36–38.

Kim, Yoon-Há, Khan, A.L., Waqas, M., Lee, In-Jung., 2017. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review. **Frontiers in Plant Science**, v.8, n.510.

Korndörfer, G.H., Pereira, H.S., Camargo, M.S., 2002. **Papel do silício na produção de cana-de-açúcar**. STAB, v.21, p.6-9.

Korndörfer, G.H., Pereira, H.S., Nolla, A., 2004. Análise de silício: solo, planta e fertilizante. **Boletim Técnico**, Uberlândia, n.2, p.34.

Kraska, J.E., Breitenbeck, G.A., 2010. Simple, robust method for quantifying silicon in plant Tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.41, p.2075-2085.

Kudryavtsev, P.G., Figovsky, O.L., 2016. Nanocomposite organomineral hybrid materials. **Nanotehnologii v stroitel'stve**, v.8, p.16-56.

Laane H.M., 2017. The effects of the application of foliar sprays with stabilized silicic acid: an overview of the results from 2003–2014. **Silicon**, v.9, p.803–807.

Landell, M.G.A., Campana, M.P., Figueiredo, P., Xavier, M.A., Anjos, I.A., Dinardo-Miranda, L.L., Scarpari, M.S., Garcia, J.C., Bidóia, M.A.P., Silva, D.N., Mendonça, J.R., Kanthack, R.A.D., Campos, M.F., Brancalião, S.R., Petri, R.H., Miguel P.E.M., 2012. **Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas**. Ribeirão Preto: Instituto Agrônômico de Campinas, p.17. (IAC. Documentos, 109).

Li, Y.P., Ye, W., Wang, M., Yan, X.D., 2009. Climate change and drought: a risk assessment of crop-yield impacts. **Climate Research**, v.39, p.31–46.

Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., Song, A., 2015. Silicon in Agriculture: from theory to practice. **Springer**, p.143-160.

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

Lichtenthaler, H.K., Buschmann, C., Knapp, M., 2005. How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio R Fd of leaves with the PAM fluorometer. **Photosynthetica**, v.43, p.379-393.

Liu, P., Yin, L., Deng, X., Wang, S., Tanaka, K., Zhang, S., 2014. Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. **Journal of Experimental Botany**, v.65, p.4747-4756.

Liu, P., Yin, L., Wang, S., Zhang, M., Deng, X., Zhang, S., Tanaka, K., 2015. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated salt-induced osmotic stress in *Sorghum bicolor*. **Environmental and Experimental Botany**, v.111, p.42-51.

Lux, A., Luxova, M., Hattori, T., Inanaga, S., Sugimoto, Y., 2002. Silicification in sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars with different drought tolerance. **Physiologia Plantarum**, v.115, p.87–92.

Ma, J.F., Yamaji, N., 2015. A cooperated system of silicon transport in plants. **Trends Plant Science**, v.20, p.435-442.

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

Machado, R.S., Ribeiro, R.V., Marchiori, P.E.R., Machado, D.F.S.P., Machado, E.C., Landell, M.G.A., 2009. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.1575-1582.

Marcos, F.C.C., Silveira, N.M., Mokochinski, J.B., Sawaya, A.C.H.F., Marchiori, P.E.R., Machado, E.C., Souza, G.M., Landell, M.G.A., Ribeiro, R.V., 2018. Drought tolerance of sugarcane is improved by previous exposure to water déficit. **Journal of Plant Physiology**, v.223, p.9-18.

Martins, A.P.C., Albrecht, L.P., Castaldo, J., Carneiro, A.R., Zucareli, V., 2015. Novas tecnologias no plantio de cana-de-açúcar (*Saccharum*spp.). **Journal of Agronomic Sciences**, v.4, p.301-317.

McKeague, J.A.; Cline, M.G., 1963. Silica in the soil. **Advances in Agronomy**, v.15, p.339–396.

Ming, D.F., Pei, Z.F., Naeem, M.S., Gong, H.J., Zhou, W.J., 2012. Silicon alleviates PEG-induced water-deficit stress in upland rice seedlings by enhancing osmotic adjustment. **Journal of Agronomy and Crops Science**, v.198, p.14-26.

Mitani, N., Yamaji, N., Ma, J.F., 2008. Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology**, v.50, p.5-12.

Pei, Z.F., Ming, D.F., Liu, D., Wan, G.L., Geng, X.X., Gong, H.J., 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**, v.29, p.106-115.

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

Rohanipoor, A., Norouzi, M., Moezzi, A., Hassibi, P., 2013. Effect of silicon on some physiological properties of maize (*Zea mays* L.) under salt stress. **Journal of Biological and Environmental Sciences**, v.7, p.71–79.

Rouphael, Y., Cardarelli, M., Schwarz, D., Franken, P., Colla, G., 2012. Effects of drought on nutrient uptake and assimilation in vegetable crops. In: Aroca R (ed) Plant responses to drought stress. **Springer**, p.171–195.

Silva, P.P., Soares, L., Costa, J.G., Viana, L.S., Andrade, J.C.F, Gonçalves, E.R., Santos, J.M., Barbosa, G.V., Nascimento, V.X., Todaro, A.R., Riffel, A., Grossi-de-Sá, M.F., Barbosa, M.H.P., Sant'ana, A.E.G., Ramalho Neto, C.E., 2012. Path analysis for selection of drought tolerant sugarcane genotypes through physiological componentes. **Industrial Crops and Products**, v.37, p.11-19.

Streit, N.M., Canterle, L.P., Canto, M.W., Hecktheuer, L.H.H., 2005. As clorofilas. **Ciência Rural**, v.35, p.748-755.

Suzuki, N., Rivero, R.M., Shulaev, V., Blumwald, E., Mittler, R., 2014. Abiotic and biotic stress combinations. **New Phytologist**, v.203, p.32-43.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I.M., Murphy, A. 2017. Fotossíntese: Reações Luminosas. In: Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal, 6ed., tradução: Alexandra Antunes Mastroberti *et al.*, p.171 – 202. Porto Alegre: Artmed

Turner, N.C., 1981. Technique sand experimental approaches for the measure ment of plant water status. **Plant and Soil**, v.58, p.339-366.

Vandeleur, R.K., Mayo, G., Shelden, M.C., Gilliam, M., Kaiser, B.N., Tyerman, S.D., 2009. The role of plasma membrane intrinsic protein aquaporins in water transport through roots: diurnal and drought stress responses reveal different strategies between isohydric and anisohydric cultivars of grapevine, **Plant Physiology**, v.149, p.445-460.

Wang, S., Wang, F., Gao, S., 2015. Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings. **Environmental Science and Pollution Research**, v.22, p.2837.

Xavier, M.A., Landell, M.G.A., Campana, M.P., Figueiredo, P., Mendonça, J.R., Dinardo-Miranda, L.L., Scarpari, M.S., Garcia, J.C., Anjos, I.A., Azania, C.A.M.,



Brançalião, S.R., Kanthack, R.A.D., Aferrri, G., Silva, D.N., Bidóia, M.A.P., Campos, M.F., Perruco, D., Matsuo, R.S., Neves, J.C.T., Cassaneli Júnior, J.R., Perruco, L., Petri, R.H., Silva, T.N., Silva, V.H.P., Thomazinho Júnior, J.R., Miguel, P.E.M., Lorenzato, C.M., 2013. **Fatores de desuniformidade e kit de pré-brotação IAC para sistema de multiplicação de cana-de-açúcar – mudas pré-brotadas (MPB)**. Ribeirão Preto: Instituto Agronômico de Campinas, p.22. (IAC. Documentos, 113).

Zanão Júnior, L.A., Fontes, R.L.F., Avila, V.T., 2009. Aplicação do silício para aumentar a resistência do arroz à mancha-parda. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.203-206.