

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

**SILÍCIO VIA FERTIRRIGAÇÃO NO CRESCIMENTO DE MUDAS PRÉ-
BROTADAS E NA PRODUTIVIDADE E QUALIDADE TECNOLÓGICA DA
CANA-PLANTA CULTIVADA EM ARGISSOLO VERMELHO AMARELO**

Tálisson Albiasetti

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

**Jaboticabal – SP
Abril/2021**

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

**SILÍCIO VIA FERTIRRIGAÇÃO NO CRESCIMENTO DE MUDAS PRÉ-
BROTADAS E NA PRODUTIVIDADE E QUALIDADE TECNOLÓGICA DA
CANA-PLANTA CULTIVADA EM ARGISSOLO VERMELHO AMARELO**

Tálisson Albiasetti

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientadores: Dr. Joaquim José Frazão

M.Sc. Jonas Pereira de Souza Júnior

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

Jaboticabal – SP

Abril/2021

A335s	Albiasetti, Tálisson Sílicio via fertirrigação no crescimento de mudas pré-brotadas e na produtividade e qualidade tecnológica da cana-planta cultivada em argissolo vermelho amarelo / Tálisson Albiasetti. -- Jaboticabal, 2021 42 p. : tabs. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Renato de Mello Prado 1. Elemento benéfico. 2. Fonte solúvel de Si. 3. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. 4. <i>Saccharum officinarum</i>. I. Título.
-------	--

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

Essa ficha não pode ser modificada.

DEPARTAMENTO: CIÊNCIAS DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA

CERTIFICADO

TRABALHO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

TÍTULO: SILÍCIO VIA FERTIRRIGAÇÃO NO CRESCIMENTO DE MUDAS PRÉ-BROTADAS E NA PRODUTIVIDADE E QUALIDADE TECNOLÓGICA DA CANA-PLANTA CULTIVADA EM ARGISSOLO VERMELHO AMARELO

ACADÊMICO: TÁLISSON ALBIASETTI

CURSO: ENGENHARIA AGRONÔMICA

ORIENTADOR: DR. RENATO DE MELLO PRADO

COORDENADORES: DR. JONAS PEREIRA DE SOUZA JÚNIOR

DR. JOAQUIM JOSÉ FRAZÃO

PERÍODO: 12/2019 À 04/2021

Este trabalho é recomendado para compor a base de dados ☐ Sim ☐ Não
CAPELO.

BANCA EXAMINADORA:

(Nomes)

(Assinaturas)

Presidente Dr. Renato de Mello Prado



Membro M. Sc. Gelza Carliane Marques
Teixeira



Membro M. Sc. José Lucas Farias da Silva



Jaboticabal 12 / 04 / 2021

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 23 / 06 / 2021



Chefe do Departamento

DEDICATÓRIA

*Dedico aos meus pais,
Paulo Donizete Albiasetti e
Rosemeire de Lima Albiasetti e
minha irmã Tainara Albiasetti.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Paulo Donizete Albiasetti e Rosemeire de Lima Albiasetti, e à minha irmã, Tainara Albiasetti, por me ajudarem na realização do experimento, desde a instalação e coleta de dados.

Agradeço aos amigos da minha república Xapô Kabô, por me apoiarem desde a ideia até a realização do experimento.

Agradeço ao Professor Renato de Mello Prado pela oportunidade de desenvolver o trabalho como meu orientador e ao Jonas Pereira de Souza Júnior e ao Joaquim José Frazão por serem meus coorientadores e me darem suporte, terem paciência e compreensão comigo.

Agradeço à Nardini Agroindustrial pelo apoio nas análises tecnológicas.

ÍNDICE

1. RESUMO	VII
2. SUMMARY	VIII
3. INTRODUÇÃO	9
4. REVISÃO DE LITERATURA	11
4.1 Importância da muda pré-brotada no cultivo de cana-de-açúcar	11
4.2 Fertilização silicatada em cana-de-açúcar e desenvolvimento de MPB	12
4.3 Efeito benéfico do Si no desenvolvimento de mudas de cana-de-açúcar.....	14
4.4 Fertilização silicatada e seus efeitos na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar	16
5. MATERIAL E MÉTODOS	17
5.1 Localização e características da área experimental.....	17
5.2 Experimento I – Silício no desenvolvimento de MPB de cana-de-açúcar.....	19
5.2.1 Formação das MPB de cana-de-açúcar.....	19
5.2.2 Delineamento, unidade experimental e aplicação de Si via fertirrigação	20
5.2.3 Avaliações fisiológicas e biométricas	21
5.2.4 Teor e acúmulo de Si nas MPB.....	22
5.3 Experimento II – Silício na produtividade e na qualidade tecnológica de cana-de-açúcar	23
5.3.1 Preparo da área experimental, delineamento, parcela experimental e aplicação dos tratamentos.....	23
5.3.2 Manejo fitossanitário.....	25
5.3.3 Amostragem e análise do teor de Si foliar da cana-de-açúcar	25
5.3.4 Produtividade e avaliação da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar	26
5.3.5 Análise estatística.....	26
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
6.1 Experimento I - Silício no desenvolvimento de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar	27
6.2 Experimento II - Silício na produtividade e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar	31
6.2.1 Teor foliar de silício, crescimento e produtividade da cana-planta	31
6.2.2 Qualidade tecnológica da cana-planta.	33
7. CONCLUSÃO	35
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1. RESUMO

A utilização do elemento benéfico silício (Si) pode beneficiar o desenvolvimento de plantas acumuladoras desse elemento como a cana-de-açúcar. Dessa forma, a utilização de Si pode favorecer aspectos básicos da fisiologia vegetal e incrementar a formação de mudas pré-brotadas (MPB), além da produtividade e da qualidade tecnológica da cana-planta. Contudo, não possuem trabalhos realizados sobre o efeito do Si na formação de MPB e de cana-planta sem déficit hídrico. Objetivou-se analisar o efeito da aplicação de Si na formação de MPB e no crescimento, produtividade e qualidade tecnológica da cana-planta. Foram desenvolvidos dois experimentos com cana-de-açúcar (variedade CTC 4). O experimento I foi conduzido em casa de vegetação com as MPB sob delineamento inteiramente casualizado, sendo testados dois tratamentos: sem e com fertirrigação (2 mmol L^{-1}) de Si, em 25 repetições. Cada unidade experimental foi composta por uma MPB transplantada para tubetes, após a emergência. Aos 45 dias após o transplântio foi avaliado o acúmulo de Si, o índice de coloração verde, a fluorescência inicial, a fluorescência máxima, a altura, o diâmetro, a área foliar e a massa seca. O experimento II foi conduzido em condição de campo sob delineamento em blocos casualizados com quatro tratamentos: sem fertirrigação de Si; Si fornecido durante a formação das MPB; Si fornecido durante a fase de desenvolvimento da cana-planta; e Si fornecido durante a fase de MPB e durante a fase de desenvolvimento da cana-planta. Após 12 meses o experimento foi finalizado. O fornecimento de Si via fertirrigação incrementa ganhos na fisiologia da planta e consequentemente no desenvolvimento das MPB. Na cana-planta também incrementa ganhos na fisiologia além de melhorar a produtividade e qualidade tecnológica do caldo.

Palavras Chave: Elemento benéfico; Fonte solúvel de Si; Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar; *Saccharum officinarum*.

2. SUMMARY

The use of the beneficial element silicon (Si) can benefit the development of plants that accumulate this element, such as sugarcane. In this way, the use of Si can favor basic aspects of plant physiology and increase the formation of pre-sprouted seedlings (PSS) in addition to the productivity and technological quality of cane-plant. However, there are no studies carried out on the effect of Si on the formation of PSS and cane-plant without water deficit. The objective was to analyze the effect of Si application on the formation of PSS and on the growth, productivity and technological quality of sugarcane. Two experiments were carried out with sugarcane (variety CTC 4). The experiment I was conducted in a greenhouse with PSS in which it was conducted in a completely randomized design, with two treatments being tested: without and with fertigation (2 mmol L^{-1}) of Si, in 25 repetitions. Each experimental unit was composed by a PSS after the emergency, transplanted to tubes. After 45 days of transplantation, Si accumulation, green color index, initial fluorescence, maximum fluorescence, height, diameter, leaf area and dry mass were evaluated. Experiment II was conducted in a field condition with a randomized block design with four treatments: without Si fertigation; Si provided during the formation of PSS; Si supplied during a development phase of the sugarcane plant; and Si supplied during a PSS phase and during the sugarcane plant development phase. After 12 months the experiment was completed and evaluated. Si supplied via fertigation increases gains in plant physiology and, consequently, in the development of PSS. In the cane-plant it also increases gains in physiology in addition to improving the productivity and technological quality of the juice.

Keywords: Beneficial element; *Saccharum officinarum*; Si application via fertigation, Soluble Si source.

3. INTRODUÇÃO

A expansão da produção do setor sucroenergético tem incrementado a demanda por novas tecnologias de produção, dentre elas o sistema de plantio de mudas pré-brotadas (MPB). Desenvolvido pelo Instituto Agrônomo de Campinas, o plantio de MPB é um sistema que proporciona economia do volume de mudas, redução do custo de plantio, melhora fitossanitária, melhor controle da qualidade de vigor do canavial recém-formado (LANDELL et al., 2012) comparado ao sistema convencional.

Apesar das vantagens econômicas e operacionais do plantio de MPB, as mudas propagadas por gemas apresentam menor reservas de nutrientes e água, em comparação aos toletes (MARTINS et al., 2015), e há problemas durante o processo de aclimação (ALMEIDA NETO et al., 2019). Neste cenário, a aplicação de elementos benéficos como o silício (Si) tem apresentado resultados promissores, aumentando o desenvolvimento de cana-de-açúcar propagada por MPB.

Apesar de não ser considerado nutriente para plantas, a utilização do elemento benéfico Si em culturas acumuladoras, como a cana-de-açúcar, pode incrementar a produtividade (CAMARGO et al., 2010) e a eficiência fotossintética (TEIXEIRA, 2018).

A aplicação do Si pode ser realizada via solo (CAMARGO et al., 2019), via foliar (LAANE, 2017; MA; YAMAJI; MITANI-UENO, 2011; SANTOS et al., 2020; TEIXEIRA et al., 2020a) ou via fertirrigação (CAMARGO et al., 2019; ROCHA et al., 2021.; TEIXEIRA et al., 2020a). O uso de fontes solúveis de Si

tem apresentado resultados promissores no aumento do acúmulo foliar do elemento em diversas culturas (FLORES et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2019), incluindo cana-de-açúcar (SANTOS et al., 2020; TEIXEIRA et al., 2020b).

Em adição, estudos demonstram correlação direta entre o fornecimento de Si e a produção e teor de açúcar em folhas de cana-de-açúcar (ALEXANDER, 1967; ALEXANDER, 1968; SAMUELS; ALEXANDER, 1969). Em adição, Zhu et al. (2016) verificaram em plantas de pepino que a aplicação de Si pode incrementar o transporte de açúcares das folhas para o caule. Esses autores atribuem esse efeito do Si à redução de atividade das enzimas hidrolíticas e oxidativas, favorecendo a produção e manutenção da sacarose, podendo incrementar a qualidade do caldo de cana-de-açúcar.

Nesse contexto é pertinente testar as hipóteses que a aplicação de Si favorece o desenvolvimento de MPB, a produtividade e a qualidade tecnológica do caldo de cana-de-açúcar sob aplicação de Si via fertirrigação em MPB e cana-planta sem a submissão de estresses – uma novidade em pesquisas.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do Si durante a formação das MPB na fisiologia e no seu desenvolvimento. Na cana-planta, objetivou-se avaliar os efeitos na fisiologia, no desenvolvimento, na produção e na qualidade tecnológica do caldo. Além disso, buscou-se avaliar o efeito do elemento nos experimentos sem indução de estresse hídrico com o intuito de observar em campo, de uma forma mais realista, o desenvolvimento sob as diversas variações climáticas durante o ciclo.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Importância da muda pré-brotada no cultivo de cana-de-açúcar

O cultivo comercial de cana-de-açúcar está presente em mais de 70 países, sendo o Brasil, Índia e China os maiores produtores (MORINI et al., 2017). No Brasil, o cultivo está relacionado ao desenvolvimento econômico (NOCELLI et al., 2017), e o país é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e de açúcar, e o segundo maior produtor no mundo de etanol, estando entre os principais exportadores (NACHILUK, 2020). Para atender a alta demanda de produção, novas tecnologias têm sido desenvolvidas, dentre elas o sistema de plantio de mudas pré-brotadas (MPB).

Desenvolvido pelo Instituto Agronômico de Campinas, o plantio de MPB é um sistema que proporciona economia do volume de mudas, sendo até então gastos no plantio convencional 11 a 14 t ha⁻¹ e no mecanizado 20 t ha⁻¹ de colmos para obter um bom índice de gemas no metro. No entanto, o sistema MPB já possui as gemas emergidas, não havendo necessidade de utilizar grande quantidade de colmos (LANDELL et al., 2012). Outras vantagens são a melhoria fitossanitária, melhor controle da qualidade de vigor do canavial recém-formado, além da redução dos custos financeiros com plantio se comparado ao sistema convencional e mecanizado. O sistema MPB consiste na retirada dos colmos, corte e preparo dos mini rebolos (gemas); tratamento das gemas; brotação; individualização (após a brotação); aclimatização na

estufa por 45 dias; processo de rustificação de um dia e plantio no campo (LANDELL et al., 2012).

As MPB facilitam a implantação do canavial, pois possuem porte pequeno e baixo peso, o que facilita seu transporte e manuseio, dispensando a utilização de máquinas e equipamentos pesados comparados aos demais sistemas de plantio (convencional e convencional mecanizado). Segundo Landell et al. (2012), a melhoria fitossanitária da MPB torna-se maior, além de melhorar a operacionalidade do plantio devido às suas características e porte. Portanto, essas são as principais vantagens na utilização do sistema MPB.

Apesar das vantagens econômicas e operacionais do plantio de MPB, as mudas propagadas por gemas apresentam menores reservas de nutrientes e água, em comparação aos toletes (MARTINS et al., 2015), e há problemas durante o processo de aclimação (ALMEIDA NETO et al., 2019). Neste cenário, a aplicação de elementos benéficos como o silício (Si) tem apresentado resultados promissores, aumentando o desenvolvimento de cana-de-açúcar propagada por MPB. Portanto, a utilização do elemento pode favorecer a MPB quando for plantada no campo e por estar diante de mudanças climáticas.

4.2 Fertilização silicatada em cana-de-açúcar e desenvolvimento de MPB

O Si é o segundo elemento químico mais abundante na superfície terrestre, sendo absorvido pelas plantas na forma de ácido monossilícico

[Si(OH)₄] (MA; YAMAJI, 2006). Apesar de não ser considerado nutriente para plantas, a aplicação desse elemento benéfico tem proporcionado resultados promissores em cana-de-açúcar, aumentando a produtividade (CAMARGO et al., 2010). Em adição, estudos indicam que a aplicação de Si alivia os efeitos deletérios do estresse hídrico (CAMARGO et al., 2017; DEMATTÊ et al., 2011; MARAFON; ENDRES 2013) e pode diminuir o estresse durante a rustificação, tornando as mudas mais tolerantes às oscilações climáticas no campo (LANDELL et al., 2012), embora estudos com adubação silicatada em MPB sejam incipientes.

O fornecimento de Si para cana-de-açúcar pode ser realizado via solo (CAMARGO et al., 2019), via foliar (LAANE, 2017; MA; YAMAJI; MITANI-UENO, 2011; TEIXEIRA et al., 2020a) ou via fertirrigação (CAMARGO et al., 2019; MITANI; MA, 2005; TEIXEIRA et al., 2020b). Sendo proposto neste trabalho o fornecimento do elemento Si em MPB e cana-planta sem submissão ao déficit hídrico.

Para o fornecimento de Si via solo, a escória de siderurgia na forma de silicato de cálcio e magnésio tem sido amplamente utilizada (DEMATTE et al., 2011). Sendo fontes com baixa solubilidade em água (SOUZA et al., 2010), necessitam ser aplicadas em grandes quantidades, as quais podem polimerizar na solução do solo reduzindo a disponibilidade de Si para as plantas (PRADO et al., 2004). Em adição, a utilização desse material é viável apenas nos locais próximos às indústrias siderúrgicas (PRADO et al., 2004), e apresenta como principal função a correção de pH do solo (ALCARDE, 1992; DEMATTÊ et al., 2011), e não o fornecimento de Si para as culturas.

Com o desenvolvimento de novas fontes solúveis de Si, como o silicato de potássio e sódio estabilizado com sorbitol e o ácido monossilícico estabilizado com PEG400, a aplicação via foliar do elemento benéfico tem se mostrado eficiente em incrementar o teor de Si em diversas culturas (FLORES et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2019; SANTOS et al., 2020), incluindo a cana-de-açúcar (FRAZÃO et al., 2020; TEIXEIRA et al., 2020a; b). A presença de estabilizantes nessas fontes reduz as taxas de polimerização do Si em solução aquosa (TEIXEIRA et al., 2020a), mantendo o elemento benéfico na forma monomérica (SiOH_4) passiva de absorção pelas plantas (EPSTEIN, 1999). Em adição, a aplicação foliar ou via fertirrigação de Si pode ser feita com fontes estáveis e em baixas concentrações, reduzindo as perdas por polimerização (MA; YAMAJI; MITANI-UENO, 2011) e os custos de aplicação. A aplicação do Si através de fontes estáveis pode facilitar o uso do elemento benéfico em viveiros de produção de mudas e em campo, sendo necessária pouca quantidade de solução aplicada para uma alta eficiência.

4.3 Efeito benéfico do Si no desenvolvimento de mudas de cana-de-açúcar

Os benefícios do fornecimento de Si para o desenvolvimento de mudas de cana-de-açúcar têm sido atribuídos às melhorias na fisiologia vegetal, com destaque para a produção e manutenção de pigmentos fotossintéticos e incremento na eficiência fotossintética (VERMA et al., 2020a).

Em cana-de-açúcar, é conhecido que a aplicação de Si aumenta a produção de pigmentos fotossintéticos, principalmente a clorofila (BOKHTIAR et al., 2012; FRAZÃO et al., 2020). Após absorvido, o Si é depositado abaixo da cutícula epidérmica e forma uma dupla camada de sílica. Com isso, o Si ocasiona mudanças na arquitetura foliar, mantendo as folhas mais eretas, com melhor interceptação da luz solar, e consequente maior taxa fotossintética, a qual infere em maior produção de clorofila a e b (RAVEN, 1983). Em adição, o Si incrementa os mecanismos de defesa antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos em cana-de-açúcar (VERMA et al., 2020b), diminuindo a ação oxidante das espécies reativas de oxigênio, que degradam clorofila (CAO et al., 2015).

Outro benefício fisiológico do Si em cana-de-açúcar está relacionado ao incremento na eficiência quântica do fotossistema II (TEIXEIRA, 2018). Para o processo fotossintético, a planta absorve luz solar que será utilizada para fotossíntese como energia, sendo captada pelo fotossistema I, do qual então, de forma gradual, é transferida para o fotossistema II, no qual ocorre a fotossíntese (BARBER, 2009). Durante a transferência entre os fotossistemas, é comum ocorrer a perda de energia na forma luminosa, a qual recebe o nome de fluorescência (ADAMS; DEMMIG-ADAMS, 2004). A intensidade dessas perdas depende do estado fisiológico da planta (MAIA JÚNIOR, 2017). Plantas com aparato fotossintético danificado apresentam maiores perdas de energia fluorescente, o que, consequentemente, reduz a eficiência fotossintética das plantas (ARAÚJO et al., 2010; MAIA JÚNIOR, 2017; SALES et al., 2013). Já em plantas com o aparato fotossintético não danificado, o Si torna mais

eficiente o processo de fotossíntese. A aplicação de Si atua na manutenção do aparato fotossintético mantendo a integridade dos fotossistemas, diminuindo a degradação, conseqüentemente, incrementando a eficiência quântica do fotossistema II (VERMA et al., 2020a, WANG et al., 2018).

Embora estudos com Si em MPB sejam incipientes na literatura, em cana-de-açúcar propagada de modo convencional, estudos indicam que a aplicação do elemento benéfico também pode favorecer o desenvolvimento e produção de massa seca das plantas, por incrementar aspectos básicos da fisiologia vegetal promovendo alongamento celular, gerando aumento de altura e diâmetro (SAVANT et al., 1999) e, conseqüentemente, maior produção de massa seca (TEIXEIRA et al., 2020b).

4.4 Fertilização silicatada e seus efeitos na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar

São incipientes os estudos sobre o efeito da aplicação de Si na qualidade tecnológica de cana-de-açúcar. Algumas poucas pesquisas realizadas com Si em cana-de-açúcar demonstraram uma relação direta entre o elemento benéfico, com a produção e o teor de açúcar foliar (ALEXANDER, 1967; 1968; AYRES, 1966; SAMUELS; ALEXANDER, 1969). Alguns autores indicam que o Si aplicado na cana-de-açúcar diminuiu a atividade de enzimas hidrolíticas e oxidativas retardando as reações de inversão e oxidação terminal dos açúcares, aumentando a produção de sacarose foliar e diminuindo teores de açúcares redutores (ALEXANDER, 1967; FOLTRAN, 2013).

O Si também reduz a ação da enzima fosfatase e conseqüentemente proporciona maior suprimento energético, responsável pelo aumento no crescimento e produção de açúcares (MARSCHNER 1995, SAVANT et al., 1999). Em estudo mais recente, foi verificado que a aplicação de Si incrementa teores de °Brix, porcentagem de sacarose aparente e porcentagem de açúcares totais recuperáveis (ALEXANDER, 1968; FOLTRAN, 2013). Desta maneira, a fertirrigação com Si apresenta o propósito de promover maior produção de açúcar na cana-planta.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Localização e características da área experimental

Foram conduzidos dois experimentos com cana-de-açúcar (variedade CTC 4), sendo o experimento I em casa de vegetação, visando à formação das MPB de cana-de-açúcar, realizado entre 02 de janeiro e 17 de fevereiro de 2019; e o experimento II, realizado em campo, visando observar o efeito na produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, realizado entre 18 de fevereiro de 2019 e 20 de março de 2020. Ambos os experimentos foram realizados no Sítio Santo Antônio (20°58'16" S 48°29'82" W), no município de Monte Azul Paulista, São Paulo, Brasil.

O clima da região é classificado como tropical úmido tipo AW, com estação chuvosa no verão e seca no inverno (ROLIM et al., 2007). Os valores

de precipitação pluvial (mm), e temperaturas máximas e mínimas do ar (°C) da área foram registrados durante o período experimental (Tabela 1).

Tabela 1. Dados de temperatura média mínima (Tmed Min), temperatura média máxima (Tmed Máx), temperatura média (Tmed), evapotranspiração (ETO), precipitação, na área experimental de janeiro de 2019 a março de 2020.

Ano	Mês	Tmed. Min. (°C)	Tmed. Máx (°C)	Tmed. (°C)	ETO (mm)	Precipitação (mm)
2019	Janeiro	20,12	31,99	26,05	76,56	100,5
	Fevereiro	19,60	30,46	25,03	57,38	286,0
	Março	19,55	30,15	24,85	62,84	182,6
	Abril	17,25	30,07	23,66	46,61	116,0
	Maio	14,01	29,03	21,52	44,22	14,2
	Junho	13,02	27,77	20,40	46,81	12,8
	Julho	11,74	27,34	19,54	55,51	13,4
	Agosto	13,80	29,17	21,49	67,37	12,5
	Setembro	17,73	33,27	25,50	86,21	60,6
	Outubro	18,99	33,81	26,40	88,79	38,8
	Novembro	19,53	31,71	25,62	63,54	187,50
	Dezembro	19,77	30,21	24,99	60,37	275,4
2020	Média/Soma	17,09	30,42	23,75	756,22	1.300,3
	Janeiro	19,74	30,89	25,31	64,22	301,80
	Fevereiro	19,64	29,09	24,36	49,28	277,0
	Março	18,04	30,89	24,47	66,67	62,2

Fonte: Estação Experimental Bebedouro

O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho Amarelo (SANTOS et al., 2018) e, antes da instalação do experimento, foi realizada amostragem do solo na camada de 0 a 20 cm de profundidade, cuja caracterização química e granulométrica apresentou os seguintes resultados:

pH (CaCl_2): 5,8; P (resina): $7,0 \text{ mg dm}^{-3}$; matéria orgânica: 11 g dm^{-3} ; K: $2,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Ca: $28 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Mg: $9,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; S: $3,8 \text{ mg dm}^{-3}$; H+Al: $14,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Al: $0,05 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; B: $0,18 \text{ mg dm}^{-3}$; Cu: $2,5 \text{ mg dm}^{-3}$; Fe: $30,5 \text{ mg dm}^{-3}$; Mn: $12,1 \text{ mg dm}^{-3}$; Zn: $16,5 \text{ mg dm}^{-3}$; argila: 20,1%; silte: 5,6% e areia: 74,3%. As análises químicas e granulométricas foram realizadas de acordo com Raij et al. (2001) e Donagema et al. (2011), respectivamente. Adicionalmente, foi analisado o teor de Si no solo (KORNDÖRFER; PEREIRA; NOLA, 2004): 8 mg dm^{-3} de Si.

5.2 Experimento I – Silício no desenvolvimento de MPB de cana-de-açúcar

5.2.1 Formação das MPB de cana-de-açúcar

As MPB de cana-de-açúcar foram obtidas em cultivo próprio no Sítio Santo Antônio ($20^\circ 58' 16'' \text{S}$; $48^\circ 29' 82'' \text{W}$), sendo cortados toletes da planta mãe com 4 cm de comprimento para selecionar as gemas. Posteriormente, as gemas passaram por processo de tratamento térmico com água quente (52°C) por 30 min (SANGUINO et al., 2006), além de tratamento com Azoxistrobina a 0,1% em solução para desinfecção e eliminação de patógenos, principalmente raquitismo da soqueira provocado pela bactéria *Leifsonia xyli* subsp. *Xyl* (DAVIS et al., 1980).

Após terem sido tratadas, as gemas foram acondicionadas em berçário, estrutura de madeira com camada de substrato formado a base de vermiculita,

carvão vegetal e casca de pinus, onde foi feita uniformização e seleção das mudas, sendo selecionadas as que apresentaram melhor brotamento.

O substrato utilizado no berçário foi adubado com 2 g L⁻¹ de cloreto de potássio (KCl), 3 g L⁻¹ de sulfato de amônio ((NH₄)₂SO₄) e 0,66 g L⁻¹ de fosfato monoamônico ((NH₄)H₂PO₄). Em adição, foi realizada uma aplicação única de reguladores de crescimento (0,05 g L⁻³ de ácido 4-indol-3ibutírico; 0,05 g L⁻³ de ácido giberélico; 0,09 g L⁻³ de cinetina) direcionado nas gemas, com uso de pulverizador costal, com a finalidade de potencializar o enraizamento inicial das gemas.

5.2.2 Delineamento, unidade experimental e aplicação de Si via fertirrigação

O experimento com as MPB foi conduzido de forma inteiramente casualizado, sendo testados dois tratamentos: sem e com fertirrigação de Si (2 mmol L⁻¹), em 25 repetições. Cada unidade experimental foi composta por uma MPB após a emergência, iniciando a fertirrigação logo após o transplântio das gemas do berçário para os tubetes com volume de 0,18 m³ preenchido com o mesmo substrato e adubos utilizados no berçário.

Após o transplântio das MPB para os tubetes iniciou-se a aplicação dos tratamentos durante 45 dias. Para isto foi realizada irrigação diária de 60 mL divididas em duas aplicações utilizando regadores, sendo uma no período da manhã e a outra ao final do período da tarde.

Como fonte de Si, foi utilizado o silicato de potássio estabilizado com sorbitol (SiKE; Si: 115 g L⁻¹; K₂O: 113,85 g L⁻¹; sorbitol: 100 mL L⁻¹; pH:12,0) com pH ajustado para 7,0 com uso de NaOH (1M) ou HCl (1M). O K foi equilibrado entre os tratamentos, sendo aplicado 54,6 mg L⁻¹ K na forma de KCl.

Durante as fertirrigações realizadas com a utilização de regadores, a temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento foram $\leq 25^{\circ}\text{C}$; $\geq 60\%$ e $\leq 6 \text{ km h}^{-1}$, respectivamente, as quais são consideradas favoráveis para aplicação foliar (PRADO, 2021). Foram realizadas regas frequentes durante os 45 dias na MPB.

5.2.3 Avaliações fisiológicas e biométricas

Transcorridos 45 dias após o transplântio das mudas, foram realizadas avaliações fisiológicas nas folhas +1 (primeira folha completa com bainha aparente), referentes ao índice de coloração verde (ICV) e à fluorescência inicial (F_0) e máxima (F_M).

O ICV foi mensurado a partir de leituras com clorofilômetro (Opti-Sciences® CCM-200), sendo realizadas cinco leituras no terço médio da folha +1 e posteriormente sendo utilizada a média para análise aritmética. A F_0 e F_m foram mensuradas a partir da medida da fluorescência da clorofila com o auxílio do fluorômetro (Opti-Sciences® OS30P). As avaliações foram realizadas entre 7h30 e 9h30 sendo, para avaliação da fluorescência, a região amostrada no terço médio da folha +1 submetida ao escuro para adaptação por 30

minutos e então excitada por um pulso de luz vermelha de 1 segundo sendo mensurado a F_0 e a F_m .

Após essas avaliações, foram também mensuradas a altura das plantas, com auxílio de uma trena, partindo da base do caule até a inserção da folha +1; e o diâmetro do caule, mensurado com auxílio de paquímetro digital rente ao solo. A parte aérea foi coletada e separada, sendo mensurada a área foliar, com o uso do AreaMeter® (L-3100, Li-Cor).

5.2.4 Teor e acúmulo de Si nas MPB

Aos 45 dias após transplântio, o caule e as folhas das MPB foram lavados em água corrente, solução detergente neutra (0,1%), solução HCl (0,1%), e água deionizada, e então secas em estufa de circulação forçada de ar a $65 \pm 5^\circ\text{C}$ até obtenção de peso constante. Após secas as amostras foram pesadas para obter a massa seca da parte aérea e então moídas em moinho tipo Willey para determinar o teor e acúmulo de Si nas MPB.

O teor de Si foi determinado a partir de digestão via úmida do material vegetal na presença de H_2O_2 e NaOH em estufa a $90 \pm 5^\circ\text{C}$ (KRASKA; BREITENBECK, 2010), e a determinação do teor de Si foi feita através de leitura colorimétrica em espectrofotômetro devido reação com molibdato de amônio, na presença de ácido clorídrico e ácido oxálico (KORNDÖRFER; PEREIRA; NOLA, 2004). O acúmulo do elemento benéfico foi então calculado como o produto entre o teor de Si e a produção de massa seca da parte aérea das MPB de cana-de-açúcar.

5.3 Experimento II – Silício na produtividade e na qualidade tecnológica de cana-de-açúcar

5.3.1 Preparo da área experimental, delineamento, parcela experimental e aplicação dos tratamentos

Após o experimento I, foi realizado um novo experimento para avaliar o efeito do fornecimento do Si no desenvolvimento da cana-planta. Para isto, o experimento II foi instalado, sendo o solo preparado a partir de aração, gradagem pesada, gradagem leve e abertura de sulcos para transplântio das MPB. O experimento foi adubado no sulco de plantio com 60, 210 e 120 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente, na forma do fertilizante formulado comercial 04-14-08.

A parcela experimental foi constituída de cinco linhas com três metros de comprimento, espaçamento de 1,5 m entre linhas e 0,5 m entre MPB na linha. A área útil foi composta pelas três linhas centrais com dois metros de comprimento, desprezando a bordadura da parcela, totalizando 9 m².

O experimento II foi conduzido em blocos inteiramente casualizados com quatro tratamentos em cinco repetições. Os tratamentos foram: sem fertirrigação de Si (0); Si fornecido com fertirrigação durante a formação das MPB (Si – M); Si fornecido com fertirrigação durante a fase de desenvolvimento da cana-planta (Si – C); e Si fornecido com fertirrigação durante a fase de MPB e durante a fase de desenvolvimento da cana-planta (Si – M + C). A fonte de Si utilizada foi a mesma citada no experimento I (SiKE) na concentração de 2

mmol L⁻¹ com pH ajustado para 7,0 com uso de NaOH (1 M) ou HCl (1M); e o teor de K foi equilibrado entre os tratamentos.

Transcorrido um mês do transplântio das MPB, iniciou-se a aplicação de Si via fertirrigação (2 mmol L⁻¹). Durante o período experimental foram realizadas sete aplicações de Si, umedecendo o solo com 0,5 mm de água antes da aplicação de Si em todos os tratamentos caso o solo estivesse seco, com intervalos de 30 dias. A quantidade fornecida de Si de acordo com os tratamentos foram: Si – 0: 0 g; Si – M: 4,5 g; Si – C: 32,49 g; Si – M + C: 36,99 g por parcela experimental, correspondendo a 0; 2; 14,44 e 16,44 kg ha⁻¹, respectivamente.

As aplicações foram realizadas com pulverizador de marca FMC®, capacidade e modelo 2000L, regulado para uma taxa de aplicação de 800 L ha⁻¹ de calda, com pressão de serviço de 2 bares, utilizando uma pistola de pulverização. As condições meteorológicas no momento das aplicações foram verificadas, estando a temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento < 26°C; >60% e < 8 km h⁻¹, respectivamente, as quais são consideradas favoráveis para aplicação foliar (PRADO, 2021). As plantas cultivadas sem fertirrigação de Si ou que receberam fertirrigação de Si apenas durante a formação de MPB receberam apenas água durante a aplicação dos tratamentos.

5.3.2 Manejo fitossanitário

O manejo fitossanitário da cultura foi realizado com o controle de plantas daninhas após o plantio e em pré-emergência com 1,8 kg ha⁻¹ de Hexazinona (132 g kg⁻¹) e Diurom (468 g kg⁻¹). Também foi aplicado 400 g ha⁻¹ de Fipronil (800 g kg⁻¹) para controle de insetos. Os inseticidas utilizados foram 400 g ha⁻¹ de Fipronil (800 g kg⁻¹) e outros ingredientes (200 g kg⁻¹).

5.3.3 Amostragem e análise do teor de Si foliar da cana-de-açúcar

Seis meses após a última aplicação de Si via fertirrigação (março de 2020), foi realizada a amostragem de dez folhas de cada parcela sendo a primeira folha completamente expandida com bainha visível (+1). Após coletadas, as amostras foliares foram descontaminadas com uso de água, solução detergente neutra (1%), solução HCl (1%) e água deionizada, e secas em estufa a 65 ± 5°C até a obtenção de massa constante. Posteriormente, as amostras foram moídas em moinho tipo Willey. Em seguida, realizou-se a análise química das folhas para determinar o teor de Si, a partir da digestão alcalina com H₂O₂ e NaOH (KRASKA; BREITENBECK, 2010), e reação colorimétrica com molibdato de amônio, sendo determinada por leitura colorimétrica em espectrofotômetro (KORNDÖRFER; PEREIRA; NOLA, 2004).

5.3.4 Produtividade e avaliação da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar

Com a maturação da cana-de-açúcar (12 meses após plantio), o experimento foi finalizado e realizou-se a colheita da área útil, sendo estimada a produtividade e mensurada a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. Para a produtividade, foram colhidos todos os perfilhos de quatro soqueiras de cana-planta dentro da área útil (9 m²), sendo eliminada a parte foliar e pesados os colmos e extrapolado para produção em 1 ha (10.000 m²).

Para as avaliações da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, foram colhidas dez canas de cada touceira da cana-planta em cada parcela, sendo retirada a parte foliar e separados apenas os colmos das mesmas. Em seguida, o material foi identificado e levado para a Unidade Industrial Nardini S/A em Vista Alegre do Alto/SP, onde a qualidade do caldo foi analisada. Determinou-se o teor de açúcar (°Brix), a porcentagem em massa de sacarose aparente no caldo (% Pol), o açúcar total recuperável (ATR) e os açúcares redutores (AR), segundo o método proposto pelo CONSECANA-SP (2006).

5.3.5 Análise estatística

Os dados de ambos os experimentos foram submetidos à análise de variância (teste F). Quando significativo, os dados foram comparados, a partir do teste de Tukey a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram

realizadas com o *software* Sisvar[®] (FERREIRA, 2014) e os gráficos elaborados utilizando o SigmaPlot[®] 12.5.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Experimento I - Silício no desenvolvimento de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar

A aplicação de Si via fertirrigação se mostrou eficiente em fornecer esse elemento benéfico para as mudas de cana-de-açúcar. As MPB que receberam o elemento via fertirrigação acumularam 0,07 g de Si, valor que representa aumento de 57% em comparação às mudas cultivadas sem fertirrigação, nas quais o acúmulo foi de 0,03 g por planta de Si (Figura 1a).

A cana-de-açúcar é classificada como planta acumuladora de Si, possuindo transportadores específicos nas raízes e sendo capaz de absorver altas quantidades do elemento via radicular (MITANI; YAMAJI; MA, 2008). A planta também possui alta capacidade de absorção foliar de fontes solúveis do elemento (FLORES et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2019; SANTOS et al., 2020; TEIXEIRA et al., 2020a). Nosso estudo evidencia a alta eficiência da aplicação via fertirrigação em incrementar o acúmulo foliar de Si em MPB (Figura 1a) por ser uma fonte solúvel e disponível para absorção pelos transportadores específicos nas raízes e pela capacidade de absorção foliar.

O incremento no acúmulo de Si nas MPB resultou em melhorias do aspecto básico da fisiologia das plantas. Esses benefícios do elemento foram constatados devido à maior produção de pigmentos, mensurados pelo índice

de coloração verde (RAVEN, 1983) (Figura 1b), nas plantas que receberam Si via fertirrigação (ICV = 14), comparado às plantas na ausência do elemento benéfico (ICV = 11).

Com a aplicação via fertirrigação, após a absorção foliar o Si é depositado abaixo da cutícula epidérmica e forma uma dupla camada de sílica (FARIA, 2000; TAKAHASHI, 1995), modificando a arquitetura foliar, mantendo as folhas mais eretas com melhor interceptação da luz solar, e, conseqüentemente, maior taxa fotossintética, a qual infere em maior produção de clorofila (RAVEN, 1983). Em adição, o Si incrementa os mecanismos de defesa antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos em cana-de-açúcar (VERMA et al., 2020b), diminuindo a ação oxidante das espécies reativas de oxigênio, que degradam clorofila (CAO et al., 2015; GONG et al. 2005).

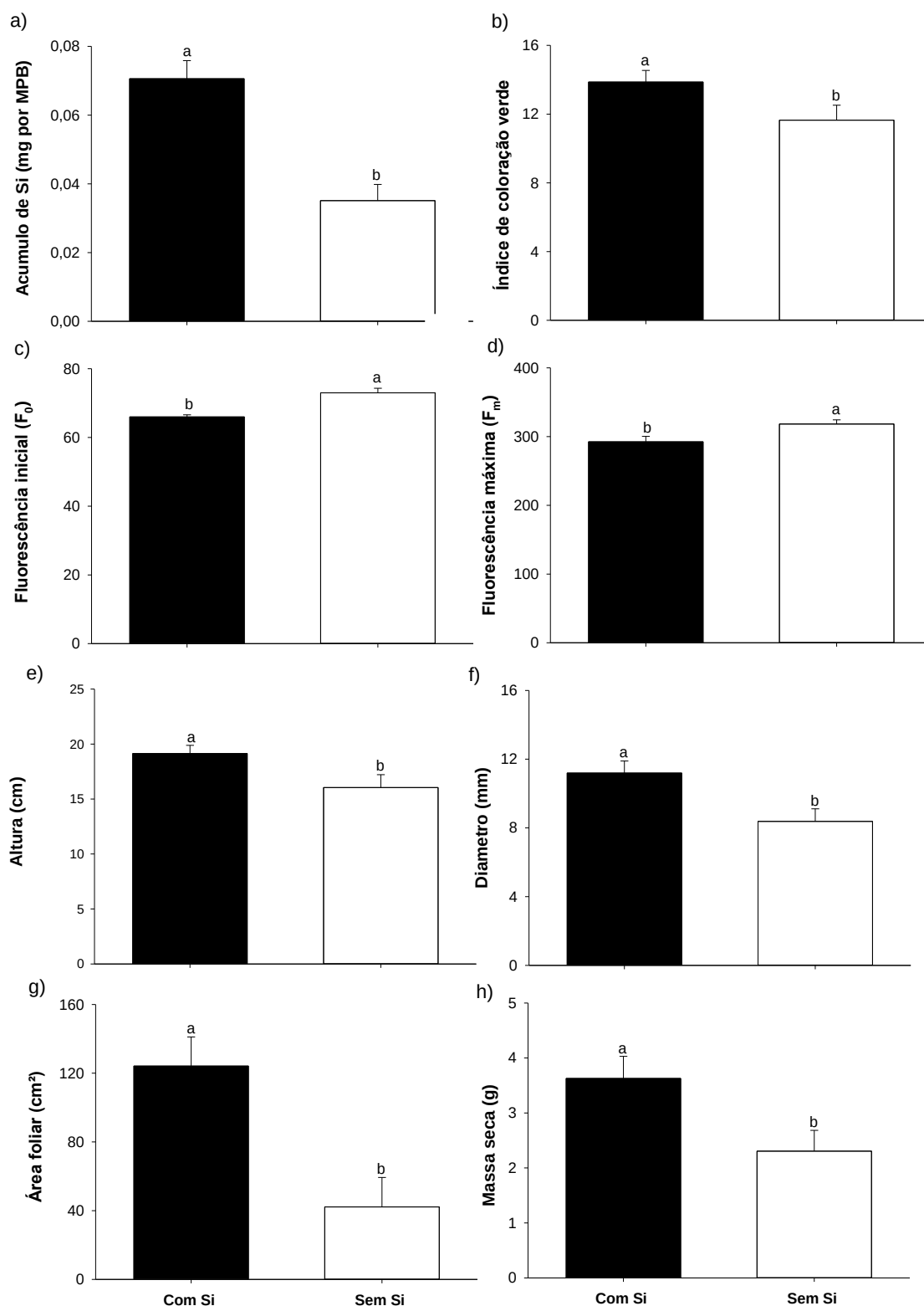


Figura 1. Acúmulo de Si (a), índice de coloração verde (b), fluorescência inicial (c), fluorescência máxima (d), altura (e), diâmetro (f), área foliar (g) e massa seca da parte aérea (h) de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar cultivadas na ausência e presença (2 mmol L^{-1}) de Si, aplicado via fertirrigação.

Em adição, o fornecimento de Si também reduziu as perdas de energia entre os fotossistemas nas MPB, com fluorescência inicial (Figura 1c) sendo a emissão proveniente do fotossistema I (PSI), e máxima (Figura 1d) sendo quando atinge o ponto máximo (KRAUSE; WEISS, 1988) de 66 e 292,5, respectivamente, em comparação às plantas cultivadas sem aplicação do elemento benéfico, com fluorescência inicial (Figura 1c) e máxima (Figura 1d) de 73 e 318,3, respectivamente. Para o processo fotossintético, a planta absorve luz solar que será utilizada para fotossíntese como energia, sendo captada pelo fotossistema I, do qual, então, de forma gradual, é transferida para o fotossistema II, no qual ocorre a fotossíntese (BARBER, 2009). Durante a transferência entre os fotossistemas é comum ocorrer a perda de energia na forma luminosa, a qual recebe o nome de fluorescência (ADAMS; DEMMIG-ADAMS, 2004). A intensidade dessas perdas depende do estado fisiológico da planta (MAIA JÚNIOR, 2017). Plantas com aparato fotossintético danificado apresentam maiores perdas de energia fluorescente, o que, consequentemente, reduz a eficiência fotossintética das plantas (ARAÚJO et al., 2010; MAIA JÚNIOR, 2017; SALES et al., 2013).

Esses benefícios na fisiologia vegetal contribuíram com o maior desenvolvimento das mudas, sendo que as plantas que receberam o elemento benéfico apresentaram maior altura (Figura 1e), diâmetro (Figura 1f), área foliar (Figura 1g) e massa seca da parte aérea (Figura 1h), comparado às plantas que não receberam o elemento via fertirrigação.

6.2 Experimento II - Silício na produtividade e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar

6.2.1 Teor foliar de silício, crescimento e produtividade da cana-planta

O fornecimento de Si via fertirrigação, com aplicação combinada durante a formação da MPB e durante o ciclo da cana-planta foi a forma de aplicação mais eficiente em incrementar o teor foliar do elemento benéfico na cana-planta. Contudo, é importante ressaltar que a aplicação de Si via fertirrigação durante apenas a fase de formação da MPB ou durante apenas o ciclo da cana-planta também foi eficiente em incrementar o teor foliar do elemento benéfico, mesmo em solo com alta disponibilidade do elemento (8 mg dm^{-3} de Si) (Figura 2a).

O desenvolvimento e a produtividade da cana-planta foram favorecidos pela aplicação via fertirrigação de Si. As plantas que receberam o elemento durante apenas a fase de formação da MPB ou durante apenas a fase de desenvolvimento da cana-planta apresentaram maior altura (Figura 2b) e diâmetro do caule (Figura 2c), comparadas às plantas cultivadas sem aplicação do elemento, sem diferenciarem entre si.

A produtividade, no entanto, foi incrementada pela presença do elemento benéfico aplicado tanto durante a fase de formação das mudas quanto durante a fase de desenvolvimento da cana-planta. Contudo, a aplicação de Si via fertirrigação durante a fase de desenvolvimento da cana-

planta apresentou maior eficiência em incrementar a produtividade, comparada à aplicação apenas durante a fase de formação da MPB (Figura 2d) por ter recebido e acumulado Si por mais tempo.

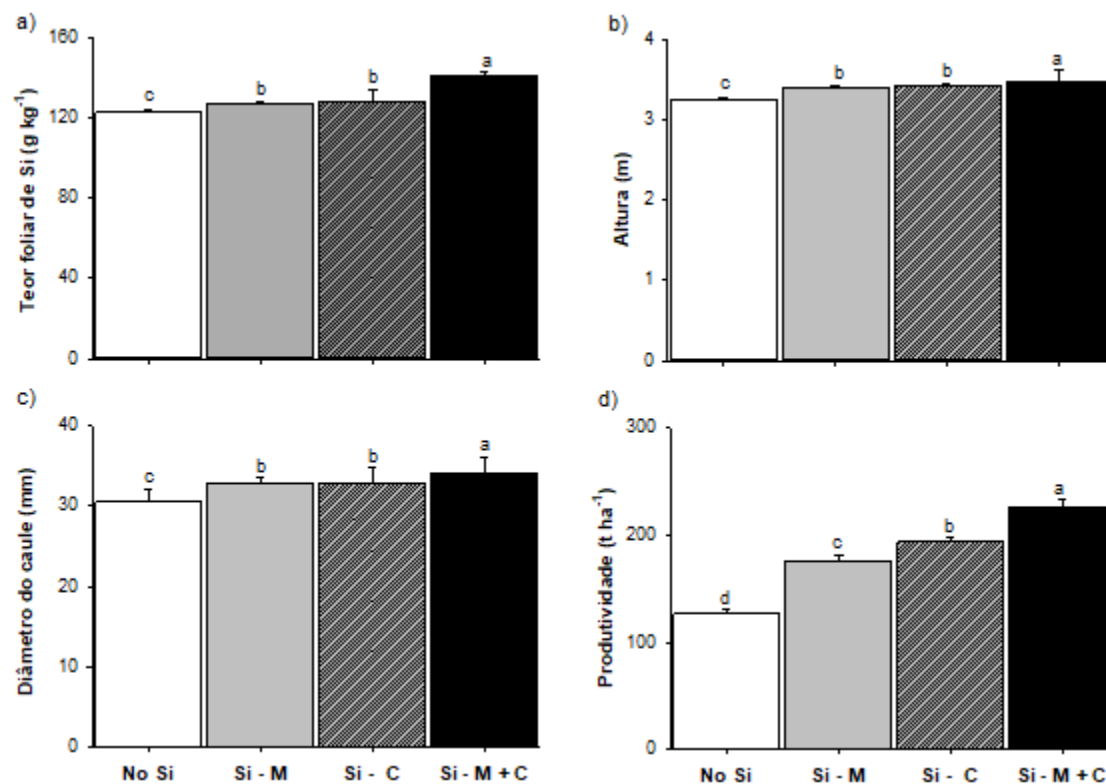


Figura 2. Teor foliar de Si (a), altura (b), diâmetro do caule (c) e produtividade (d) da cana-planta cultivada na ausência de Si (0) com fornecimento de Si apenas durante a fase de MPB (Si - M), apenas na formação da cana-planta (Si - C) e associação do Si na fase de MPB e na formação da cana-planta (Si - M + C).

Apesar dos bons resultados das aplicações em fases isoladas, o maior desenvolvimento das plantas em altura (Figura 2b) e diâmetro (Figura 2c), mensuradas até Setembro de 2019, e a maior produtividade (Figura 2d) foram observados com a aplicação de Si em conjunto durante a fase de formação da MPB e durante a fase de desenvolvimento da cana-planta devido à maior quantidade de Si acumulada na planta.

O incremento em produtividade da cana-de-açúcar pode ser explicado sendo ela classificada como uma planta acumuladora de Si (SAVANT et al., 1999) e ter recebido a aplicação do elemento benéfico em diferentes fases. A aplicação de Si atua na manutenção do aparato fotossintético mantendo a integridade dos fotossistemas e, conseqüentemente, incrementando a eficiência quântica do fotossistema II (TEIXEIRA, 2018; VERMA et al., 2020a; WANG et al., 2018), além dos ganhos com alongamento celular, gerando aumento em altura e diâmetro (SAVANT et al., 1999). Desse modo, podemos concluir que a planta fica mais eficiente fisiologicamente além de possuir maior estrutura em porte, justificando o aumento em massa fresca ($t\ ha^{-1}$).

6.2.2 Qualidade tecnológica da cana-planta.

O fornecimento de Si via fertirrigação em conjunto, durante a fase de formação das MPB e na fase de desenvolvimento da cana-planta, e a aplicação de Si apenas durante a fase de desenvolvimento da cana-planta, foram eficientes em incrementar as variáveis tecnológicas da cana-planta, incrementando o °Brix (Figura 3a) e a porcentagem de sacarose aparente no caldo (Figura 3b); diminuindo a porcentagem de açúcares redutores no caldo (Figura 3d) sem diferenciarem entre si.

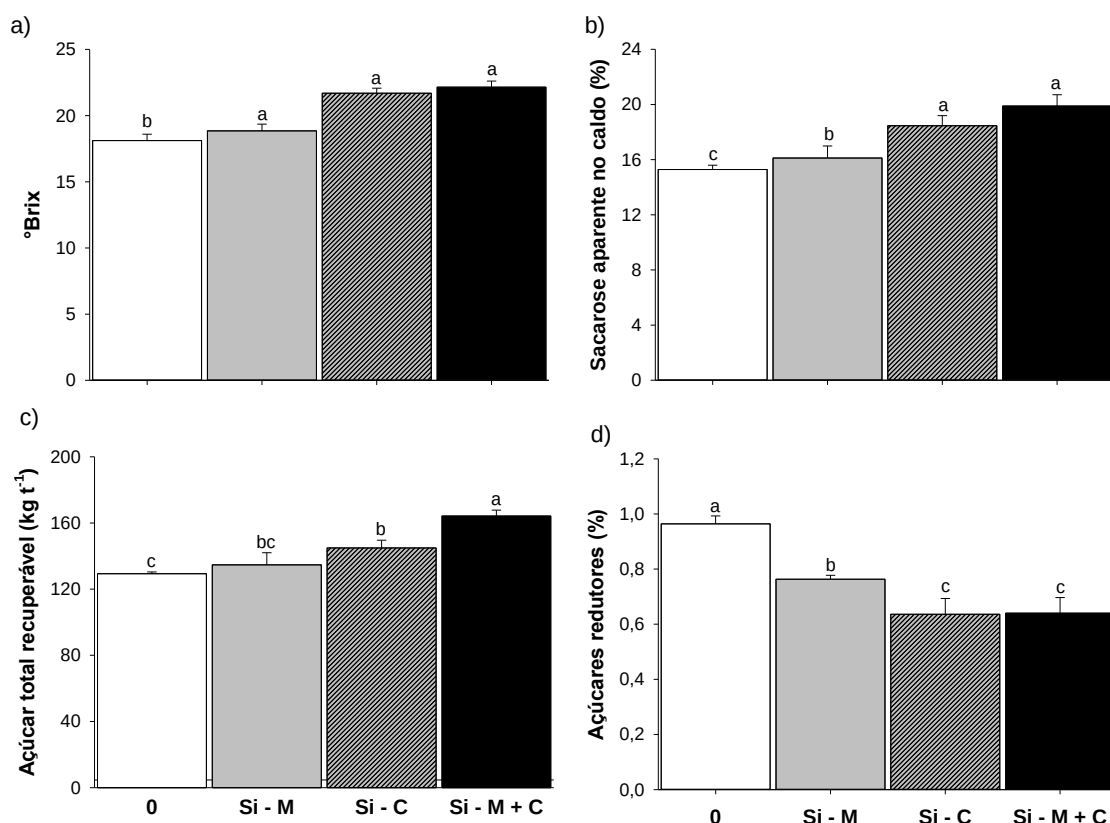


Figura 3. °Brix (a), sacarose aparente no caldo (b), açúcar total recuperável (c) e açúcares redutores (d) no caldo de cana-de-açúcar, cultivada na ausência de Si (0), com fornecimento de Si apenas durante a fase de MPB (Si – M), apenas na formação da cana-planta (Si – C) e a associação do Si na fase de MPB e na formação da cana-planta (Si – M +C).

A aplicação do Si em cana-de-açúcar demonstra uma relação direta com a produção e teor de açúcar (AYRES, 1966; ALEXANDER, 1967, 1968; SAMUELS; ALEXANDER, 1969; FOLTRAN, 2013). O Si aplicado na cana-de-açúcar afeta as enzimas hidrolíticas e oxidativas (ALEXANDER, 1967), retardando as reações de inversão e oxidação terminal aumentando a produção de sacarose foliar (ALEXANDER, 1968; FOLTRAN, 2013).

Além dos efeitos gerados a aplicação de Si aumentou teores de °Brix (Figura 3a), sacarose aparente (Figura 3b) e açúcar total recuperável (Figura 3c). Estudos com pepino relatam que a aplicação de Si aumentou o transporte

de sacarose foliar para o caule, o que pode explicar os ganhos em sacarose no caldo de cana-de-açúcar (ZHU et al., 2016).

Em adição, a aplicação do elemento benéfico em conjunto durante as duas fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar diminuiu, com maior eficiência, a porcentagem de açúcar total recuperável do caldo (Figura 3c). Teores elevados de açúcar recuperável interferem nos processos industriais depreciando a qualidade do caldo através do escurecimento na cor do açúcar e diminuindo a pureza (FERNANDES, 2011).

7. CONCLUSÃO

Nas MPB de cana-de-açúcar, o fornecimento de Si via fertirrigação incrementa acúmulo foliar, índice de coloração verde, altura, diâmetro, área foliar, massa seca, eficiência fotossintética, aumentando o desenvolvimento das MPB.

Na cana-planta, o Si incrementa teores de Si foliar, altura, diâmetro, produtividade, °Brix, sacarose aparente e açúcar total recuperável e diminui o açúcar recuperável.

Os resultados promovidos pela aplicação do elemento benéfico via fertirrigação em cana-de-açúcar mostram que, embora passando por um período com pouca precipitação, houve ganhos em produtividade por hectare e ganhos em ATR, incrementando a rentabilidade da área ao produtor. Portanto, a utilização e o fornecimento de Si via fertirrigação torna-se recomendada, principalmente pelo grande período sem chuvas.

Mediante os dados apresentados no trabalho, conclui-se ser a fertirrigação a melhor forma de aplicação do elemento na cana-de-açúcar, estando em forma solúvel e totalmente disponível à absorção para a planta.

No entanto, a realização de novos estudos com cálculos de diferentes lâminas de aplicação pode ser necessária, a fim de estabelecer menores aplicações com maiores volumes de calda, diminuindo o número de aplicações no campo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, W. W.; DEMMIG-ADAMS, B. Chlorophyll Fluorescence as a Tool to Monitor Plant Response to the Environment. In: Papageorgiou G. C., Govindjee (eds) Chlorophyll a Fluorescence. Advances in Photosynthesis and Respiration, vol 19. 2004. **Springer**, Dordrecht.

ALCARDE, J. C. Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas. **ANDA - Boletim Técnico**, 1992.

ALEXANDER, A. G. Effects of foliar combinations of gibberellic acid and silicon on sucrose production by sugarcane. **The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico**, v. 52, p. 218-226, 1968.

ALEXANDER, A. G. Enzyme-sugar relationships in immature sugarcane treated with ascorbic acid, cysteine, hydroxylamine, cyanide, silicon, and iron. **The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico**, v. 51, p. 46-54, 1967.

ALMEIDA NETO, L. A.; PANDORFI, H.; MORAES, A. S.; GUSELINI, C.; C. JÚNIOR, J. J. F. Biophotonics: acclimation of pre-sprouted sugarcane seedlings in protected environment. **Engenharia Agrícola**, v. 39, p. 410-418, 2019.

ARAÚJO, S. A. C.; VASQUEZ, H. M.; CAMPOSTRINI, E.; TORRES NETTO, A.; DEMINICIS, B. B.; LIMA, E. S. Características fotossintéticas de genótipos de capim-elefante anão (*Pennisetum purpureum* Schum) em estresse hídrico. **Acta Scientiarum**, v. 32, p. 107, 2010.

AYRES, A. S. Calcium silicate slag as a growth stimulant for sugarcane on low-silicon soils. **Soil Science**, v. 101, p. 216-227, 1966.

BARBER, J. Photosynthetic energy conversion: natural and artificial. **Chemical Society Reviews**, v. 38, p. 185-196, 2009.

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

CAMARGO, M. S. D.; BEZERRA, B. K. L.; HOLANDA, L. A.; OLIVEIRA, A. L.; VITTI, A. C.; SILVA, M. A. Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 81-91, 2019.

CAMARGO, M. S. D.; BEZERRA, B. K. L.; HOLANDA, L. A.; OLIVEIRA, A. L.; VITTI, A. C.; SILVA, M. A. Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 81-91, 2019.

CAMARGO, M. S. D.; BEZERRA, B. K. L.; VITTI, A. C.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, A. L. Silicon fertilization reduces the deleterious effects of water deficit in sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, p. 99-111, 2017.

CAMARGO, M. S. D.; KORNDÖRFER, G. H.; FOLTRAN, D. E.; HENRIQUE, C. M.; ROSSETTO, R. Absorção de silício, produtividade e incidência de *Diatraea saccharalis* em cultivares de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 69, p. 937-944, 2010.

CAO, B.; MA, Q.; ZHAO, Q.; WANG, L.; XU, K. Effects of silicon on absorbed light allocation, antioxidant enzymes and ultrastructure of chloroplasts in tomato leaves under simulated drought stress. **Scientia Horticulturae**, v. 194, p. 53-62, 2015.

CONSECANA-SP - Conselho dos Produtores de cana-de-açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo. **Manual de instruções**. CONSECANA-SP. 2006.

DAVIS, M. J.; GILLASPIE JÚNIOR; A. G.; HARRIS, R. H. Ratton stunting disease of sugarcane: Isolation of the causal bacterium. **Science**, v. 210, p. 1365-1367, 1980.

DEMATTE, J. L. I.; PAGGIARO, C. M.; BELTRAME, J. A.; RIBEIRO, S. S. Uso de silicatos em cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, v. 133, p. 7-12, 2011.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. M. Manual de métodos de análise de solo. **Embrapa Solos-Documents**, v. 2, 2011.

EPSTEIN, E. Annual review of plant physiology and plant molecular biology. **Silicon**, v. 50, p. 641-664, 1999.

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

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. 3. ed., STAB – Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 2011. 416p

FERREIRA, D. F. Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, p. 109-112, 2014.

FLORES, R. A.; ARRUDA, E. M.; DAMIN, V.; SOUZA JUNIOR, J. P.; MARANHÃO, D. D. C.; CORREIA, M. A. R.; PRADO, R. M. Physiological quality and dry mass production of *Sorghum bicolor* following silicon (Si) foliar application. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, p. 631-638, 2018.

FOLTRAN, R. **Aplicação foliar de silício associado ou não a maturadores em cana-de-açúcar**. 2013. 115 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, UNESP, 2013.

FRAZÃO, J. J.; PRADO, R. M.; SOUZA JÚNIOR, J. P.; ROSSATTO, D. R. Silicon changes C:N:P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. **Scientific Reports**, v. 10, 2020.

GONG, H.; ZHU, X.; CHEN, K.; WANG, S.; ZHANG, C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v. 169, p. 313-321, 2005.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLA, A. Análise de silício: solo, planta e fertilizante. **GPSi-ICIAG-UFU (Boletim técnico, 2)**, 2004.

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

KRAUSE, H.; WEIS, E. The photosynthetic apparatus and chlorophyll fluorescence: an introduction. In: LICHTENTHALER, H. K. (ed.). **Applications of chlorophyll fluorescence**. Kluwer Academic Publishers, p. 3-11, 1988.

LAANE, H. M. 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, 2017.

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. Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas. **Instituto Agrônomo de Campinas. (Documentos IAC)**, 2012.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. 11, p. 392-397, 2006.

MA, J. F.; YAMAJI, N.; MITANI-UENO, N. Transport of silicon from roots to panicles in plants. **Proceedings of the Japan Academy - Series B**, v. 87, p. 377-385, 2011.

MAIA JÚNIOR, S. O. **Tolerância de cultivares de cana-de-açúcar ao déficit hídrico: relações hídricas, trocas gasosas, fluorescência da clorofila e metabolismo antioxidante**. 2017. 146 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Produção Vegetal) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, 2017.

MARAFON, A. C.; ENDRES, L. Silicon: fertilization and nutrition in higher plants. **Embrapa Tabuleiros Costeiros-Artigo em periódico indexado**, v. 56, p. 380-388, 2013.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 ed. Academic Press, 1995. p. 889.

MARTINS, A. P. C.; ALBRECHT, L. P.; CASTALDO, J.; CARNEIRO, R.; ZUCARELI, V. Novas tecnologias no plantio de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). **Journal of Agronomic Sciences**, v. 4, p. 301-317, 2015.

MITANI, N.; MA, J. F. Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, p. 1255-1261, 2005.

MITANI, N.; YAMAJI, N., MA, J. F. Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology**, v. 50, p. 5-12, 2008.

MORINI, M. S. C.; SILVA, O. G. M.; ZAMBON, V.; NOCELLI, R. C. F. Cultura de cana-de-açúcar no Brasil: manejo, impactos econômicos, sociais e ambientais. In: FONTANETTI, C. S.; BUENO, O. C. (org.). **Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica**. Canal 6, cap. 2, 2017.

NOCELLI, R. C. F.; ZAMBOM, V.; SILVA, O. G. M.; MORINI, M. S. C. Histórico da cana-de-açúcar no Brasil: contribuições e importância econômica. In: FONTANETTI, C. S.; BUENO, O. C. (org.). **Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica**. Canal 6, cap. 1, 2017.

NACHILUK, K. Cana-de-açúcar: produção e processamento em 2019. **IEA - Instituto de Economia Agrícola do Estado de São Paulo**. 2020.

OLIVEIRA, R. L. L.; PRADO, R. M.; FELISBERTO, G.; CHECCHIO, M. V.; GRATÃO, P. L. Silicon mitigates manganese deficiency stress by regulating the physiology and activity of antioxidant enzymes in sorghum plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 524-534, 2019.

PRADO, R. M. **Mineral nutrition of tropical plants**. Springer Nature, 2021.

PRADO, R. M.; NATALE, W.; FEERNANDES, F. M.; CORREA, M. C. M. Reactivity of a slag in a distrofic red latosol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 197-205, 2004.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. **IAC - Instituto Agrônomo de Campinas**, 2001.

RAVEN, J. A. The transport and function of silicone in plants. **Biological Reviews**, v. 58, p. 179-207, 1983.

ROCHA, J. R.; PRADO, R. M.; TEIXEIRA, G. C. M.; OLIVEIRA FILHO, A. S. B. Si fertigation attenuates water stress in forages by modifying carbon stoichiometry, favouring physiological aspects. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 217, p. 12479, 2021.

ROLIM, G. S.; CAMARGO, M. B. P.; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 66, p. 711-720, 2007.

SALES, C. R. G.; RIBEIRO, R. V.; SILVEIRA, J. A. G.; MACHADO, E. C.; MARTINS, M. O.; LAGÔA, A. M. M. A. Superoxide dismutase and ascorbate peroxidase improve the recovery of photosynthesis in sugarcane plants subjected to water deficit and low substrate temperature. **Planta Physiology and Biochemistry**, v. 73, p. 326-336, 2013.

SAMUELS, G.; ALEXANDER, G. Influence of variable manganese and silicone on the nutrition, sugar production, and enzyme activity of immature sugarcane. **The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico**, v. 53, p. 14-27, 1969.

SANGUINO, A.; MORAES, V.A.; CASAGRANDE, M.V. **Curso de formação e condução de viveiros de mudas de cana-de-açúcar**, v. 43, 2006.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. Á.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília: Embrapa, p. 365, 2018.

SANTOS, L. C. N.; TEIXEIRA, G. C. M.; PRADO, R. M.; ROCHA, A. M. S.; PINTO, R. C. S. Response of pre-sprouted sugarcane seedlings to foliar spraying of potassium silicate, sodium and potassium silicate, nanosilica and monosilicic acid. **Sugar Tech**, v. 22, p. 773-781, 2020.

SAVANT, N. K.; KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E.; DATNOFF, G. H. Silicon nutrition and sugarcane production: a review. **Journal of Plant Nutrition**, v. 22, p. 1853-1903, 1999.

SOUSA, J. V.; RODRIGUES, C. R.; LUZ, J. M. Q.; SOUSA, V. B. F.; CARVALHO, P. C.; RODRIGUES, T. M.; BRITO, C. H. Silicato de potássio via foliar no milho: fotossíntese, crescimento e produtividade. **Bioscience Journal**, v. 26, p. 502-513, 2010.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of sílica. *In*: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. (ed.) Science of the rice plant: physiology. **Food and Agriculture Policy Research Center**, v. 2, p. 420-433, 1995.

TEIXEIRA, G. C. M. **Silício na mitigação do déficit hídrico de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar na fase inicial de crescimento**. 2018. 57 f. Dissertação (Mestre em Agronomia - Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, 2018.

TEIXEIRA, G. C. M.; PRADO, R. M.; ROCHA, A. M. S.; SANTOS, L. C. N.; SARAH, M. M. S.; GRATÃO, P. L.; FERNANDES, C. Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the effects of water deficit after transplanting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 849-859, 2020a.

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

VERMA, K. K.; ANAS, M.; CHEN, Z.; RAJPUT, V. D.; MALVIYA, M. K.; VERMA, C. L.; SINGH, R. K.; SINGH, P.; SONG, X.; LI, Y. R. Silicon supply improves leaf gas exchange, antioxidant defense system and growth in *Saccharum officinarum* responsive to water limitation. **Plants**, v. 9, p. 1032, 2020b.

VERMA, K. K.; LIU, X.; WU, K.; SINGH, R. K.; SONG, Q.; MALVIYA, M. K.; SONG, X.; SINGH, P. VERMA, C. L.; LI, Y. The impact of silicon on photosynthetic and biochemical responses of sugarcane under different soil moisture levels. **Silicon**, v. 12, p. 1355-1367, 2020a.

WANG, Y.; ZHANG, B.; JIANG, D.; CHEN, G. Silicon improves photosynthetic performance by optimizing thylakoid membrane protein components in rice under drought stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 158, p. 117-124, 2018.

ZHU, Y.; GUO, J.; FENG, R.; JIA, J.; HAN, W.; GONG, H. The regulatory role of silicon on carbohydrate metabolism in *Cucumis sativus* L. under salt stress. **Plant and Soil**, v. 406, p. 231-249, 2016.