

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**

**KATERIN MANUELITA ENCINA OLIVA**

**EXTRAÇÃO DO Si E EFEITOS DA FERTILIZAÇÃO SILICATADA NA  
CANA-DE-AÇÚCAR, CULTIVADA EM SOLO ARENOSO**

**RECIFE**

**2019**



Katerin Manuelita Encina Oliva  
Engenheira Agrônoma

**Extração do Si e efeitos da fertilização silicatada na cana-de-açúcar,  
cultivada em solo arenoso**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Clístenes Williams  
Araújo do Nascimento

Coorientador: Prof. Dr. Emídio Cantídio  
Almeida de Oliveira

Recife

2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada à fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

O48e Oliva, Katerin Manuelita Encina  
Extração do Si e efeitos da fertilização silicatada na cana-de-açúcar,  
cultivada em solo arenoso / Katerin Manuelita Encina Oliva. – 2019.  
90 f. : il.

Orientador: Clístenes Williams Araújo do Nascimento.  
Coorientador: Emídio Cantídio Almeida de Oliveira.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de  
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo,  
Recife, BR-PE, 2019.  
Inclui referências.

1. Cana-de-açúcar 2. Silício 3. *Diatraea saccharalis* I. Nascimento,  
Clístenes Williams Araújo do, orient. II. Oliveira, Emídio Cantídio  
Almeida de, coorient. III. Título

CDD 631.4

KATERIN MANUELITA ENCINA OLIVA

**Extração do Si e efeitos da fertilização silicatada na cana-de-açúcar, cultivada em solo arenoso**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 18 de fevereiro de 2019

---

Prof. Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento  
Orientador  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Emídio Cantídio Almeida de Oliveira  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Dra. Adriana Souza  
Universidade Federal Rural de Pernambuco



## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho aos meus pais Emerita Oliva, Amir Encina e Inez Urquia pelo apoio e amor em cada momento. E a minhas irmãs Rosita, Marlin, Xhyamira, Zhenny e Diana*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Clístenes Williams, pela orientação, apoio, confiança e paciência nestes 2 anos.

Ao Dr. Fernando Bruno Vieira, pelo apoio, amizade e contribuições durante todo o desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Emídio Cantídio Almeida de Oliveira, pelas contribuições ao trabalho.

A todos os professores da área de Solos do Departamento de Agronomia da UFRPE, pelo ensino.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco, por me acolher e possibilitar a realização do meu mestrado.

À Usina Miriri Alimentos e Bioenergia S/A, pela disponibilização da área experimental e os recursos durante o experimento.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Aos meus amigos e companheiros Marina Monteiro, Luiz Henrique e Paula Caroline pelo apoio no trabalho.

As técnicas Simone e Paula Renata e as pós-doutorandas Josângela e Adriana pelo apoio.

Aos estagiários Aline, Franklone, Taziana, Djennyfer, Rafael e Diogo.

Meu grande amigo Eder, pelo apoio, confiança, conselhos e amizade.

Aos meus amigos peruanos Franco, Luz, Carlos, Carla, Flor, Midori e Melissa por estar sempre presentes do meu progresso.

A secretária Socorro.



## Extração do Si e efeitos da fertilização silicatada na cana-de-açúcar, cultivada em solo arenoso

### RESUMO GERAL

A cana-de-açúcar é uma cultura de importância econômica no Brasil, portanto é indispensável a fertilização adequada para obter produtividades esperadas. O Si desempenha um papel fundamental no desenvolvimento desta cultura e é absorvido em grandes quantidades. A avaliação eficiente da disponibilidade de Si às plantas é fundamental para ajustar as recomendações da fertilização silicatada. O objetivo deste trabalho foi determinar a eficiência de 4 extratores (ácido acético 0,5 mol L<sup>-1</sup>, CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e água destilada) na avaliação da disponibilidade de Si no solo, além de avaliar o efeito da fertilização com diatomita nas características químicas do solo, além da nutrição, produtividade e características tecnológicas da cana-de-açúcar. Para tanto, foram coletadas amostras de solos e de folhas diagnose em diferentes áreas de cultivo de cana entre os estados de Pernambuco e Paraíba. Foram determinados os teores disponíveis de Si em cada extrator e na folha. Posteriormente, foi montado um experimento em casa de vegetação, utilizando um Neossolo Quartzarênico, que foi submetido a doses de Si (0, 75, 150, 225, 300 e 375 kg ha<sup>-1</sup>) na forma de um fertilizante granulado a base de diatomito. Foram avaliadas as características químicas do solo, biomassa e acúmulo de nutrientes e Si na planta. Outro experimento foi conduzido em campo, em uma área de cultivo de cana-de-açúcar no estado da Paraíba, sob um Neossolo Quartzarênico, neste trabalho foram aplicadas doses de diatomito (0, 125, 250, 500 e 750 kg ha<sup>-1</sup>) e no cultivo anual da cultura. Os resultados mostraram que o ácido acético extraiu maiores quantidades de Si disponível, porém o CaCl<sub>2</sub> foi quem obteve melhores correlações com o Si absorvido pela planta para a maioria dos solos avaliados. Houve correlação positiva entre a biomassa da cana e o acúmulo de Si. A fertilização silicatada aumentou a disponibilidade de P, K, Mn e Cu no solo. A absorção de Si promoveu aumento nos teores de N, P, S, Mn e Zn na parte aérea da cana-de-açúcar. A aplicação de diatomito no cultivo em campo incrementou as características biométricas, a absorção de macro e micronutrientes e reduziu significativamente o dano causado pela broca do colmo (*Diatraea saccharalis*). Estes resultados foram determinantes para o aumento significativo da produtividade e das características tecnológicas da cana-de-açúcar. Portanto, a integração de uma metodologia eficiente de avaliação de Si disponível no solo, associado ao manejo da adubação da cana-de-açúcar com silício pode ser alternativa viável para obtenção de maiores produtividades para a cana-de-açúcar cultivada em solos arenosos.

**Palavras chave:** Diatomito. Extratores de Si. Produtividade. *Diatraea saccharalis*.



## SILICON EXTRACTION AND EFFECTS OF SILICATE FERTILIZATION ON SUGARCANE GROWN ON SANDY SOIL

### ABSTRACT

Sugarcane is a crop of economic importance in Brazil, and adequate fertilization is indispensable to obtain expected yields. Si plays a key role in the development of this culture and is absorbed in large quantities. The efficient evaluation of Si availability to the plants is fundamental to adjust the recommendations of silicate fertilization. The objective of this work was to determine the efficiency of 4 extractors (acetic acid  $0.5 \text{ mol L}^{-1}$ ,  $\text{CaCl}_2$   $0.01 \text{ mol L}^{-1}$ ,  $\text{KCl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$  and distilled water) in the evaluation of Si availability in soil, besides evaluating the effect of diatomite fertilization on soil chemical characteristics, the nutrition, productivity and technological characteristics of sugarcane. For that, samples of soils and diagnostic leaves were collected in different areas of sugarcane cultivation between the states of Pernambuco and Paraíba. The levels of Si were determined on each extractor and on the leaf. Subsequently, a greenhouse experiment was carried out using a Arenosol, which was submitted to Si doses (0, 75, 150, 225, 300 and  $375 \text{ kg ha}^{-1}$ ) in the form of a diatomite granulated fertilizer. The chemical characteristics of the soil, biomass and nutrient accumulation and Si in the plant were evaluated. Another experiment was carried out in a field of sugarcane cultivation in the State of Paraíba, under a Arenosol. In this work, diatomite doses were applied (0, 125, 250, 500 and  $750 \text{ kg ha}^{-1}$ ) in the annual crop cultivation. The results showed that acetic acid extracted larger amounts of available Si, but  $\text{CaCl}_2$  was the one that obtained better correlations with Si absorbed by the plant for the majority of evaluated soils. There was a positive correlation between sugarcane biomass and Si accumulation. Silicate fertilization increased the availability of P, K, Mn and Cu in the soil. The uptake of Si increased the N, P, S, Mn and Zn contents in the aerial part of the sugarcane. The application of diatomite in field cultivation increased the biometric characteristics, the absorption of macro and micronutrients and significantly reduced the damage caused by the sugarcane borer (*Diatraea saccharalis*). These results were decisive for the significant increase in productivity and technological characteristics of sugarcane. Therefore, the integration of an efficient methodology for the evaluation of Si available in soil associated with the management of the fertilization of sugarcane with silicon can be a viable alternative to obtain higher yields for sugarcane cultivated in sandy soils.

**Keywords:** Diatomite. Si extractors. Productivity. *Diatraea saccharalis*.



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	17
1.1. Hipóteses .....	18
1.2. Objetivo Geral .....	18
1.3. Objetivos Específicos .....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
2.1. A cana-de-açúcar .....	19
2.2. Silício em solos .....	20
2.3. Solos com produção de cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco e Paraíba .....	21
2.4. Silício nas plantas .....	22
2.5. Fertilizantes Silicatados.....	23
2.6. Sílica amorfa.....	23
2.7. Extração e determinação do silício disponível no solo .....	24
2.8. A broca da cana-de-açúcar ( <i>Diatrea Saccharalis</i> ) .....	25
REFERÊNCIAS .....	26
3. EXTRATORES NA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE SILÍCIO PARA CANA-DE-AÇÚCAR .....	31
RESUMO .....	31
ABSTRACT .....	32
3.1. INTRODUÇÃO.....	33
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	34
3.2.1. Área de estudo e amostragem de solos e plantas .....	34
3.2.2. Análise de Si solúvel no solo .....	35
3.2.3. Análise do Si total na planta.....	36
3.2.4. Granulometria e teores de óxidos de Fe, Al e Si no solo .....	36
3.2.5. Análises estatísticas.....	36
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	37
3.3.1. Análise do solo e teores médios de Si extraído.....	37
3.3.2. Correlação entre o Si disponível e os teores de Argila .....	38

3.3.3. Correlação entre o Si disponível e os teores de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	40
3.3.4. Correlação entre o Si disponível e os teores de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	42
3.3.5. Correlações entre o Si disponível e o Si absorvido pela cana-de-açúcar.....	44
3.4. CONCLUSÃO.....	45
REFERÊNCIAS .....	46
4. EFEITOS DA APLICAÇÃO DE DIATOMITA NA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA EM UM SOLO ARENOSO .....	51
RESUMO .....	51
ABSTRACT .....	52
4.1. INTRODUÇÃO.....	53
4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	54
4.2.1. Montagem do experimento .....	54
4.2.2. Análises químicas da planta e do solo.....	55
4.2.3. Análises estatísticas.....	57
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	57
4.3.1. Produção de biomassa e absorção de Si pela cana-de-açúcar .....	57
4.3.2. Si solúvel e alterações nas propriedades químicas e físicas no solo. ....	60
4.3.3. Avaliação nutricional .....	63
4.4. CONCLUSÃO.....	66
REFERÊNCIAS .....	66
5. SILICATO AMORFO NA NUTRIÇÃO, PRODUTIVIDADE E SEVERIDADE DE <i>Diatraea saccharalis</i> EM CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA EM UM SOLO ARENOSO.....	71
RESUMO .....	71
ABSTRACT .....	72
5.1. INTRODUÇÃO.....	73
5.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	74
5.2.1. Local do estudo, amostragem e caracterização do solo. ....	74
5.2.2. Montagem e condução do experimento. ....	75
5.2.3. Avaliações biométricas .....	76

5.2.4. Avaliação do ataque da Broca ( <i>Diatrea saccharalis</i> ) .....	77
5.2.5. Análise tecnológica e produtividade .....	77
5.2.6. Análise química.....	77
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	77
5.3.1. Efeito do Si na biometria da cana-de-açúcar.....	77
5.3.2. Teores de Si nas folhas e colmo .....	79
5.3.3. Efeito do Si na absorção de macro e micronutrientes na cana-de-açúcar .....	80
5.3.4. Efeito do Si no ataque da broca da cana-de-açúcar ( <i>Diatrea saccharalis</i> ) .....	82
5.4. CONCLUSÃO.....	86
REFERÊNCIAS .....	86



## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é o maior mundial produtor de cana-de-açúcar. Atualmente possui uma área plantada de 9,0 milhões de hectares. O Nordeste possui 10 % da produção nacional e tem produtividade média de 52,0 t ha<sup>-1</sup>. A cana-de-açúcar absorve grandes quantidades de Si, podendo em alguns casos superar o acúmulo dos macronutrientes.

No solo, o teor total de Si é alto (> 50 %), mas a fração prontamente disponível às plantas é muito baixa. A disponibilidade de Si no solo varia em função da mineralogia, do pH do solo, dentre outros fatores; sendo que, os solos arenosos são os apresentam menor disponibilidade, devido à alta estabilidade dos minerais na qual o Si está associado (a exemplo o quartzo); e a perda por lixiviação, principalmente na época chuvosa. Nos solos intemperizados, o Si encontra-se adsorvido e/ou co-precipitado nos óxidos de Fe e Al, apresentando baixa solubilidade.

A avaliação da disponibilidade do Si no solo e sua importância na nutrição mineral das plantas apresenta grande dificuldade pela falta de correlação dos métodos de extração de Si com a absorção pela planta e a produtividade, representando um fator limitante para ajustar as recomendações da fertilização com Si. Diversos extratores são utilizados para avaliar o Si disponível, sendo mais comuns CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> ácido acético 0,5 mol L<sup>-1</sup> e solução tamponada de acetato de sódio. No Brasil o CaCl<sub>2</sub> e ácido acético são comumente utilizados.

Na cana-de-açúcar, o Si desempenha um papel fundamental no desenvolvimento desta cultura, uma vez que melhora as características físicas e químicas e incrementa a disponibilidades de nutrientes no solo. Na planta o Si é acumulado na forma de sílica amorfa hidratada, principalmente em células relacionadas à proteção, armazenamento, suporte e fortalecimento da planta. Esta acumulação prove a planta uma barreira mecânica contra o ataque de doenças e pragas, reduz a toxicidade causada por metais, além de reduzir as perdas de água pela transpiração e o estresse por sais. Estas vantagens na planta são determinantes no incremento do rendimento e da qualidade da cana-de-açúcar.

Diversas pragas como a *Diatraea saccharalis* podem gerar a cana-de-açúcar. Estes danos são causados pela abertura de galerias que ocasionam perda de peso da cana e que podem levar a planta à morte, especialmente no estágio inicial de desenvolvimento. Neste sentido, o Si pode retardar a penetração das larvas deste inseto, gerando dessa forma um incremento da mortalidade da praga e uma redução do dano.

### **1.1.Hipóteses**

O extrator mais eficiente está representado por aquele que consegue extrair maiores teores de Si disponível do solo e é evidenciado pelos maiores teores de Si absorvido pela planta.

A fertilização silicatada com diatomita é capaz de aumentar a disponibilidade do Si e dos nutrientes nos solos arenosos cultivados com cana-de-açúcar.

O suprimento de Si via diatomita em solos arenosos deficientes neste elemento promove o acúmulo de Si na cana-de-açúcar que por sua vez terá efeito positivo sobre a produtividade, às características tecnológicas e o status nutricional da cultura,

O acúmulo de Si na planta reduz o dano causado por *Diatraea saccharalis*.

### **1.2.Objetivo Geral**

Diagnosticar a disponibilidade de Si nos solos da formação de barreirascultivados com cana-de-açúcar nos estados de Pernambuco e Paraíba e avaliar a eficiência de um fertilizante silicatado a base de sílica amorfa sobre a nutrição mineral, a produtividade e as características tecnológicas da cana-de-açúcar cultivada em um Neossolo Quartzarênico.

### **1.3. Objetivos Específicos**

Determinar o extrator de Si do solo melhor correlacionado com a concentração de Si em plantas da cana-de açúcar cultivados em condições de campo.

Avaliar o efeito da diatomita na nutrição mineral e produção de biomassa de plantas de cana de açúcar sob condições de casa de vegetação.

Avaliar os efeitos da adubação silicatada na biometria, absorção de Si e nutrientes, produtividade, características tecnológicas.

Avaliar os efeitos do Si na prevenção do ataque de *Diatraea saccharalis* em cana-de-açúcar cultivada em campo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. A cana-de-açúcar

A planta da cana-de-açúcar é uma gramínea perene, pertencente à família Poaceae e do gênero *Saccharum* L. Esta planta é originada do sudeste asiático e comumente disseminada por propagação assexuada (mediante colmos) (MAGRO et al., 2011). A cana-de-açúcar desenvolve-se em forma de touceira, formada por colmos na parte aérea. A cultura é adaptada a condições de alta luminosidade, temperatura e umidade do solo, este último especialmente em sua fase de crescimento, portanto é ideal para cultivo em regiões tropicais.

A planta possui metabolismo C<sub>4</sub>, portanto, é considerada altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química. Sendo esta conversão afetados pelas condições ambientais como luz solar, pelas mudanças nas concentrações de CO<sub>2</sub>, pela disponibilidade de água, pela temperatura e pelos nutrientes disponíveis. (MAGRO et al., 2011).

Comercialmente a propagação desta planta é assexuada, feita mediante os pedaços de colmos. As raízes temporárias é o primeiro órgão em se desenvolver e suprem à planta de nutrientes durante o estágio de desenvolvimento até aparecer as raízes permanentes. O colmo (caule) representa o órgão de reserva e encontra-se envolto pelas bainhas das folhas alternadas, podendo ser de distintas cores. A folha encontra-se dividida em bainha e lâmina. As folhas podem ser enumeradas pelo sistema de Kuijper, sendo enumeradas de acima para abaixo. A primeira folha é designada +1 e a folha +3 é geralmente como folha de diagnose para a avaliação de estado nutricional (CASAGRANDE, 1991; MAGRO et al., 2011).

O cultivo de cana-de-açúcar apresenta 4 fases de desenvolvimento: brotação, perfilhamento, crescimento e maturação. Na fase de brotação a energia é obtida da degradação dos órgãos de reserva do colmo, esta fase dura aproximadamente 30-35 dias e é influenciada pela umidade e temperatura do solo e pela areação. A segunda fase, o perfilhamento, ocorre na parte subterrânea. É influenciado principalmente pela variedade, a luminosidades, a temperatura e a nutrição equilibrada. A fase de crescimento, o desenvolvimento máximo é do segundo até o sétimo mês (plantas de 12 meses). A fase de maturação é definida como o momento de acumulação máxima de produtos fotoassimilados no colmo. O acúmulo ocorre pronunciadamente da base ao ápice do colmo (MAGRO et al., 2011).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Com a crescente demanda mundial por etanol, o Brasil apresenta potencial para o crescimento da exportação, uma vez que possui condições edafoclimáticas favoráveis e extensas áreas disponíveis para o cultivo da cana-de-açúcar. Atualmente a área plantada com cana no Brasil é de 9 milhões de hectares. O Sudeste do país possui a maior área da produção (63%), seguido pelo centro-Oeste (20%) e nordeste (10%). A produção estimada é cerca de 600 milhões de toneladas anuais enquanto a produtividade média brasileira é de 72 toneladas de cana por hectare. Nos estados da Paraíba e Pernambuco possuem produção estimada de 18 milhões de toneladas e produtividade média de 52 t/ha (CONAB, 2019).

## 2.2. Silício em solos

O Si é o principal componente de minerais silicatados, compreendendo o 28% da crosta terrestre (WEDEPOHL, 1995). No solo, o Si solúvel é gerado pelo intemperismo dos minerais primários. Uma fração do Si liberado reage com Al, Fe, e, em menor grau com Mg, para formar minerais secundários, enquanto o restante é lixiviado, gerando uma perda de Si e cátions básicos; este processo ocorre em maior grau em ambientes tropicais (MATICHENKOV; CALVERT, 2002; KARATHANASIS, 2006)

As principais fontes de ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ) para a solução do solo são a decomposição de resíduos orgânicos; a dissociação de ácidos polissilícicos; dessorção de Si dos óxidos e hidróxidos de Fe e Al; a dissolução de minerais cristalinos e não-cristalinos. Por outro lado, os principais drenos incluem a precipitação do Si em solução, a polimerização de ácidos monossilícicos, (formando ácido polissilícico), a lixiviação, a adsorção em óxidos e hidróxidos de Fe e Al, e a absorção pelas plantas (LIMA FILHO; LIMA; TSAI, 1999; NASCIMENTO; CUNHA; RODRIGUEZ, 2009).

Em solos, os silicatos amorfos, aparentemente contribuem para os processos de adsorção de ânions, e tem sido sugerido que íons de silicato e fosfato competem por sítios de adsorção em coloides do solo, adicionalmente o Si pode formar precipitados com Al, Fe e Ca, modificando o comportamento do Si no solo (SAVANT et al., 1999; POZZA; POZZA; BOTELHO, 2015).

De modo geral, os teores de Si dissolvidos na solução do solo variam entre 1,0 e 200  $mg L^{-1}$  (KATABA-PENDIAS, 2011), sendo seu equilíbrio e formas no solo dependentes do pH (EPSTEIN, 1999). Assim, em pH do solo de 4,0 a 6,5, o  $H_4SiO_4$  é a principal forma de silicato encontrado na solução do solo enquanto que pH acima de 8,5, a espécie iônica  $H_3SiO_4^-$  é a

predominante (DEMATTÊ et al., 2011). Estes mesmos autores mencionam que em concentrações acima de  $28 \text{ mg L}^{-1}$  na solução a forma do monômero  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  se polimeriza formando precipitados de sílica amorfa.

Nos solos arenosos, o Si geralmente está presente em minerais silicatados como feldspatos, plagioclásios, ortoclásio e, principalmente, quartzo, que é a principal forma de Si no solo. O quartzo é um mineral caracterizado por possuir alta estabilidade e resistência ao intemperismo (MEUER, 2012), portanto, disponibilizando baixo teor de Si solúvel disponível às plantas; este mineral também é conhecido por ocorrer em uma forma não cristalina, opala, que é presumível ser de origem biológica (KABATA-PENDIAS, 2011). Estas características estão presentes no solo Neossolo Quartzarênico, os quais são originados principalmente de arenitos ou sedimentos arenosos não consolidados, com elevados teores de areia. Demattê et al. (2011) mencionam que solos arenosos, apresenta baixas quantidades de filosilicatos e menores quantidades de Si em solução.

### **2.3. Solos com produção de cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco e Paraíba**

O cultivo de cana-de-açúcar nos estados de Pernambuco concentra-se principalmente na Zona da Mata Norte e Sul, enquanto na Paraíba, encontra-se principalmente na Zona da Mata Sul. A Mata Sul da Paraíba e Mata Norte de Pernambuco estão incluídas no grupo de barreiras, portanto apresentam geologia semelhante (relativamente uniforme e composta). Constituídas por sedimentos arenoso-argiloso não consolidado de origem continental. Nesta Zona encontra-se principalmente os solos das classes Argissolos amarelos e Latossolos amarelos (CPRM, 2002; CPRM, 2014).

Na Zona da Mata Sul de Pernambuco, apresenta uma geologia mais diversificada. Encontra-se principalmente solos das classes Latossolos amarelos, Argissolos amarelos, Argissolos e vermelho-amarelos, isto é, devido ao intemperismo químico mais intenso. Apresentam fertilidade muito baixa devido à natureza do material de origem e das condições climáticas vigentes, proporcionando a formação de solos caulíníticos (CPRM, 2014)

A formação barreiras possui como maior representante os Tabuleiros Costeiros ao longo da costa brasileira (a partir da latitude  $2^\circ\text{N}$  até  $22^\circ\text{S}$  (DOMPIERI et al. 2015). Na Região Nordeste do Brasil, o ambiente dos tabuleiros costeiros está dominado pela agroindústria da cana-de-açúcar, os quais compreendem uma área de 8,42 milhões de hectares. Os tabuleiros costeiros apresentam relevo plano a ondulado e ocorrência de latossolos, argilosos e areias quartzosas (SILVA et al., 2014; DOMPIERI et al., 2015).

## 2.4. Silício nas plantas

O Si do solo é absorvido pelas plantas como ácido monossilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). A absorção pode se dar por processo passivo, comum em dicotiledôneas, ou por um processo ativo (operante em monocotiledôneas) mediante transportadores específicos situados na membrana plasmática das células das raízes (MITANI; MA, 2005).

Dentro da planta, o Si é depositado na forma de sílica amorfa hidratada ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). A deposição em órgãos maduros geralmente ocorre em células de tecidos relacionados à proteção, armazenamento, suporte e fortalecimento e é influenciada pela idade, tipo e localização dos tecidos, bem como pela absorção e respiração da raiz, além dos nutrientes e teor de água, pH e tipo de solo (DATNOFF; SNYDER; KORNDÖRFER, 2001). Na planta, a maior concentração do Si encontra-se nas folhas; estes teores podem variar de 0,14% a 6,7% da matéria seca das folhas (ANDERSON; SYNDER; MARTIN, 1991). O Si acumulado nos tecidos das plantas pode representar de 0,1 a 10% da matéria seca total (KORNDÖRFER; PEREIRA; CAMARGO, 2004).

O Si que se concentra na epiderme foliar forma uma barreira mecânica à invasão de fungos no interior das células, além de proteger a folha do ataque de insetos (EPSTEIN, 1999); além disso, a deposição de Si nas folhas contribui para melhorar a distribuição e prevenir a toxidez por Mn nos tecidos, reduzir a perda de água por transpiração, reduzir efeitos adversos causados pelo excesso de N e aumentar a resistência a estresses. Geralmente, mais do 90% do Si é transloucado para os brotos. Posteriormente, o Si é depositado como sílica amorfa  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , principalmente nos locais de transpiração (MA; TAKAHASHI, 2002) e não sendo redistribuído (ADREES et al., 2015).

Espécies da família das gramíneas, que inclui importantes culturas como arroz, cana-de-açúcar, milho e trigo, apresentam grande capacidade de acumular Si, esta capacidade varia de acordo com o genótipo considerado (BARBOSA FILHO et al., 2001). Segundo Korndörfer, Pereira e Camargo, (2004), a cana-de-açúcar responde favoravelmente à adubação com Si, especialmente nos solos arenosos, devido à baixa concentração deste elemento. Devido à alta capacidades de absorção de Si pela cana-de-açúcar, ela é considerada uma planta acumuladora de Si (HAYNES, 2014).

De acordo com Kidder e Gascho (1977), os aumentos de produtividade da cana-de-açúcar variam notadamente entre 10% e 35% com a aplicação de silicato no solo. Prado e

Fernandes (2000), avaliando a resposta da cana-de-açúcar à aplicação de escória silicatada como corretivo de acidez do solo, observou que o perfilhamento da cana-de-açúcar foi influenciado positivamente pela aplicação da escória de siderurgia na cana-planta e cana-soca.

## **2.5. Fertilizantes Silicatados**

Os fertilizantes silicatados podem influenciar as culturas de duas formas: melhorando as propriedades químicas e a fertilidade do solo, e agindo diretamente sobre o crescimento e o desenvolvimento vegetal. (MATICHENKOV; CALVERT, 2002). Marafon e Endres (2011), mencionam que os fertilizantes silicatados aumentam a eficiência da adubação NPK. A fertilização de Si deve ser considerada essencial para produção comercial da cana-de-açúcar, no entanto, pode ser limitado pelos custos da aplicação dos fertilizantes (DATNOFF; SNYDER; KORNDÖRFER, 2001).

As escórias siderúrgicas são as fontes de Si mais utilizadas e estudadas. Este subproduto é uma fonte abundante e barata de silicatos, tendo como constituintes os silicatos de cálcio e de magnésio (MALAVOLTA; PIMENTEL-GOMES; ALCARDE, 2002). Muitas escórias siderúrgicas utilizadas como fontes de Si, contêm quantidades significativas de metais pesados, o que limita sua utilização.

No Brasil, resultados positivos na produtividade de cana-de-açúcar com fertilização silicatada são observados especialmente em solos arenosos, com teor de Si solúvel extraído com  $0,01 \text{ mol L}^{-1} \text{ CaCl}_2$  abaixo de  $8 \text{ mg kg}^{-1}$  (CAMARGO; ROCHA; KORNDÖRFER, 2013).

## **2.6. Sílica amorfa**

Muitos fertilizantes silicatados têm altos teores de Si total, mas muitas vezes o elemento está na forma cristalina ou não solúvel, não podendo ser prontamente absorvido pelas plantas. Nesse sentido, a diatomita (Si amorfo) constitui um fertilizante alternativo. Uma das fontes de Si amorfo ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) é a opala, que é uma sílica amorfa hidratada, também chamada sílica opalina, uma espécie de diatomito de origem sedimentar ou biogênica. Esta espécie de diatomito foi constituída a partir do acúmulo de carapaças de algas diatomáceas fossilizados (BREESE, 1994). A constituição deste material é principalmente sílica opalina (58 a 91%), além de impurezas como argilominerais, matéria orgânica, hidróxidos, areia quartzosa e carbonato de cálcio e de magnésio. Este diatomito é depositado em cavidades e fissuras nas rochas, a partir da precipitação química de águas ricas em Si ou pode ter origem na acumulação

de restos de esqueletos de organismos marinhos, tanto animais (radiolários e espículas de certas esponjas) quanto vegetais (diatomáceas) (SOUZA et al., 2003).

Os fertilizantes a base de sílica amorfa são uma boa fonte de Si disponível para as plantas, uma vez que a diatomita é mais facilmente solubilizada do que adubos de silicato de cálcio e escórias, além de possuir uma capacidade de troca catiônica e retenção de água devido a sua elevada área superficial e porosidade (PATI et al., 2016) não apresentada pelos demais fertilizantes silicatados. Entretanto, os benefícios na nutrição e na produtividade das culturas com a fertilização com silicato amorfo ainda são pouco documentados (PATI et al., 2016; PRAKASH; ANITHA, SANDHYA, 2016; CROOKS; PRENTICE, 2017).

## **2.7. Extração e determinação do silício disponível no solo**

Na literatura existem diversos extratores de Si, porém ainda existem dúvidas de qual é o melhor extrator. Inocêncio, Gutierrez e Novelino (2010) mencionam que o teor de argila é o principal fator a ser considerado; Camargo et al., (2005), por sua parte, menciona que a textura também é um fator importante a ser considerado. Na atualidade de todos os extratores de Si solúvel estudados, nenhum foi efetivo em todos os tipos de solos porque as quantidades de Si extraído variam muito dependendo de diversos fatores, incluindo a natureza do extrator. (CRUSCIOL et al., 2018).

As soluções extratoras de Si disponível do solo mais utilizados são: ácido acético 0,5 mol L<sup>-1</sup>, CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, tampão fosfato, tampão acetato de sódio e ácido sulfúrico. As soluções ácidas são consideradas as mais efetivas por diversos pesquisadores, embora possam superestimar os níveis de Si disponível (GUTIERREZ; INOCÊNCIO; NOVELINO, 2011; ABE; YAMASAKI; WAKATSUKI, 2016; XU et al., 2001). A água, também usado como extrator, extrai quantidades diferentes dos presentes na solução do solo devido a sua força iônica (HAYNES, 2014). O CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> é um sal que tem a capacidade de extrair o Si disponível que se encontra principalmente na solução do solo. Este extrator possui uma força iônica semelhante à da solução do solo, evitando a dispersão e favorecendo a extração de Si, a diferencia do ácido acético, o CaCl<sub>2</sub> também apresenta a vantagem de não sofrer interferência do calcário recentemente aplicado ao solo. As soluções ácidas acetato de Na e ácido acético geram, adicionalmente, a dissolução de compostos amorfos hidróxidos e óxidos de Fe e Al amorfos, aluminossilicatos cristalinos amorfos e altamente solúveis, superestimando assim o teor de silício disponível (HAYNES, 2014; SAUER et al. 2006; HOHN et al., 2008). No Brasil os extratores utilizados são o ácido acético (0,5 mol L<sup>-1</sup>) e CaCl<sub>2</sub> (0,01 mol L<sup>-1</sup>).

Os extratores apresentam eficiências diferentes para avaliação da disponibilidade do Si devido aos diversos fatores que influenciam a solubilidade, como o pH, mineralogia, entre outros (SNYDER, 2001; BABU et al., 2016). Portanto, a avaliação com precisão da disponibilidade Si no solo apresenta grande dificuldade, representando um fator limitante para ajustar as recomendações da fertilização com Si (CAMARGO et al., 2005; GUTIERREZ; INICÊNCIO; NOVELINO, 2011).

Dentre os métodos para determinação de Si solúvel, o colorimétrico é o mais utilizado devido ao menor custo de instrumentação, maior rapidez, precisão, baixo custo e possibilidade de determinação de concentrações pequenas ou elevadas de Si (DATNOFF et al., 2001). Na determinação do Si é usado o molibdato de amônio como complexante devido a sua reação com o ácido monossilícico que é a principal forma de Si absorvido pelas plantas. Este método envolve a reação do ácido silícico com o ácido molíbdico [ $H_4(SiMo_{12}O_{40})$ ]

Diversos trabalhos têm demonstrado os efeitos benéficos da fertilização silicatada em cana-de-açúcar, no entanto ainda não existem recomendações de Si ajustada para esta cultura, devido ao fato de não existir uma metodologia eficiente na avaliação do Si disponível nos diferentes tipos de solos que correlacione com o Si absorvido pela planta e a produtividade.

## **2.8. A broca da cana-de-açúcar (*Diatrea Saccharalis*)**

A *Diatrea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) causa danos principalmente em cultivos da América Central e América do Sul. Apresenta um ciclo biológico de aproximadamente 60 dias. Os ovos são depositados nas folhas, depois de 4-6 dias ocorre a eclosão das larvas. Inicialmente estas larvas alimentam-se do parênquima folhar, posteriormente penetram o colmo pela parte mais mole, formando galerias de abaixo para arriba (GARCIA, 2013).

As larvas causam danos diretos, principalmente pela abertura de galerias, ocasionando perdas da cana (KEEPING; MEYER; SEWPERSAD, 2013; CAMARGO; KORNDÖRFER; WYLER, 2014). Em plantas jovens e fracas, esta larva pode causar a morte da planta. As galerias transversais podem ocasionar a quebra do colmo, especialmente na presença de fortes ventos. A aberturas das galerias ocasionam a entrada de fungos como *Colletotrichum falcatum* e *Fusarium subglutinans*, que causam a podridão vermelha do colmo. Os fungos invertem a sacarose, diminuindo a pureza do caldo e o rendimento industrial no processo de produção de açúcar e/ou álcool. Para cada 1% de Índice de Intensidade de Infestação Final da praga (número de entrenós atacados pelo complexo broca/podridão-vermelha), ocorrem prejuízos de 0,42% na

produção de açúcar ou 0,25% na produção de álcool e mais 1,14 % na produção de cana (TCH), sendo os prejuízos maiores em cana planta (GARCIA, 2013).

## REFERÊNCIAS

- ABE, S. S.; YAMASAKI, Y.; WAKATSUKI, T. Assessing silicon availability in soils of rice-growing lowlands and Neighboring uplands in Benin and Nigeria. **Rice Science**, Hangzhou, v. 23, n. 4, p. 196-202, 2016.
- ADREES, M.; ALI, S.; RIZWAN, M.; ZIA-UR-REHMAN, M.; IBRAHIM, M.; ABBAS, FARID, M.; QAYYUM, M. F.; IRSHAD, M. K. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, New York, v. 119, p. 186-197, 2015.
- ANDERSON, D. L.; SYNDER, G. H.; MARTIN, F. G. Multi-year response of sugarcane to calcium silicate slag on Everglades Histosols. **Agronomy Journal**, Bangladesh, v. 83, n. 5, p. 870-874, 1991.
- BABU, T.; TUBANA, B.; PAYE, W.; KANKE, Y.; DATNOFF, L. Establishing soil silicon test procedure and critical silicon level for rice in Louisiana soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 47, n. 12, p. 1578-1597, 2016.
- BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G. H.; FAGUEIRA, N. K.; DATNOFF, L. E.; SILVA, O. F al. Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 325-330, 2001.
- BREESE, R. O. Y. Diatomite. In: CARR, D. D. (Ed.). **Industrial Minerals and Rocks**. 6. ed. Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1994, p. 397- 412.
- CAMARGO, M. S. de; KORNDÖRFER, G. H.; WYLER, P. Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. **Field Crops Research**, Netherlands, v. 167, p. 64-75, 2014.
- CAMARGO, M.S. DE; ROCHA, G.; KORNDÖRFER, G.H. Silicate fertilization of tropical soils: silicon availability and recovery index of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.5, p.1267-1275, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000500016> .
- CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; CORRÊA, G. F.; PEREIRA, H. S.; BARBOSA, D. S.; RESENDE, R. H. Soluble silicon extractants in soils: lime and phosphorus influence. **Biosci. J.**, Uberlandia, v. 21, n. 2, p. 9-19, 2005.
- CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Funep, 1991
- CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Brasília: Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 28 ene. 2019.

CPRM - Serviço geológico do Brasil. **Geodiversidade do estado de Pernambuco**. Programa geologia do Brasil Levantamento da geodiversidade. Recife, 2014. 282 p.

CPRM - Serviço geológico do Brasil. **Geologia e recursos minerais do estado da Paraíba**. Recife, 2002. 234 p.

CROOKS, R.; PRENTICE, P. Extensive investigation into field based responses to a silica fertiliser. **Silicon**, Netherlands v.9, n.2, p.301-304, 2017.

CRUSCIOL C. A. C.; ARRUDA D. P.; FERNANDES A. M.; ANTONANGELO J. A.; LUÍS REYNALDO F. A.; NASCIMENTO C. A. C.; OTÁVIO R. B.; MCCRAY J. M. Methods and extractants to evaluate silicon availability for sugarcane. **Scientific reports**, London, v. 8, n. 1, p. 916, 2018.

DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. 424p. ISSN: 0928-3420

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

DOMPIERI, M.; RESENDE, R.; BARRETO, A.; CRUZ, M.; da SILVA, A. A. G.; NOGUEIRA JUNIOR, L. R.; ...; FERNANDES, M. Delimitação da área foco de atuação da Embrapa Tabuleiros Costeiros e principais aspectos fisiográficos. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. 41 p.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Biology**, v. 50, n. 1, p. 641-664, 1999.

GARCIA F.F. **Manual de identificação de pragas da cana**. Capinas 219 p. 2013

GUTIERREZ, R. S.; INOCÊNCIO, M. F.; NOVELINO, J. O. Extraction of silicon in soils fertilized with phosphate and silicate. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 01-07, 2011.

HAYNES, R. J. A. Contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 177, p. 831-844, 2014.

HÖHN, A.; SOMMER, M.; KACZOREK, D.; SCHALITZ, G.; BREUER, J. Silicon fractions in histosols and gleysols of a temperate grassland site. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 171, n. 3, p. 409-418, 2008.

INOCÊNCIO, M. F.; GUTIERREZ, R. S.; NOVELINO, J. O. Avaliação de métodos de extração de silício e fósforo em amostras de solos. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 4, p. 75-83, 2010.

KARATHANASIS, A. D. Clay Minerals: Weathering and Alteration of. In: **Encyclopedia of Soil Science**. 2. ed. New York: Taylor and Francis Group, 2006. p 281-285.

KATABA-PENDIAS, A. Trace elements in soil and plants. 4 ed. Florida: CRC Press, 2011. 505 p.

KEEPING, M. G.; MEYER, J. H.; SEWPERSAD, C. Soil silicon amendments increase resistance of sugarcane to stalk borer *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae) under field conditions. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 363, n. 1-2, p. 297-318, 2013.

KIDDER, G.; GASCHO, G. J. Silicate slag recommended for specified conditions in Florida sugarcane. **Agronomy facts**, Flórida Cooperative Extension Service, University of Flórida, n. 65, 1977.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**, 3. ed. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 2004. 28p.

LIMA FILHO, O. F.; LIMA, M. T. G.; TSAI, S. O silício na agricultura. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 87, n. 1, p. 1-7, 1999.

MA, J. F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan**. New York: Elsevier Science, 2002. 274p.

MAGRO, F.; TAKAO, G.; CAMARGO, P. E.; TAKAMATSU, S. Y. **Biometria em cana de açúcar**. São Paulo: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz- ESALQ, 2011. 18p.

MALAVOLTA, E.; PIMENTEL-GOMES, F.; ALCARDE, J. C. **Adubos e adubações**. São Paulo: Nobel, 2002. 200p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba, São Paulo: POTAFOS, 1997. 319p.

MARAFON, A. C.; ENDRES, L. **Adubação silicatada em cana-de-açúcar**. Aracaju: EMBRAPA Tabuleiros Costeiros - EMBRAPA, 2011. 46 p. Disponível em [http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes\\_2011/doc\\_165.pdf](http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2011/doc_165.pdf). Acesso em: 02 out. 2017.

MATICHENKOV, V. V.; CALVERT, D. V. Silicon as a beneficial element for sugarcane. **Journal American Society of Sugarcane Technologists**, Baton Rouge, v.22, p. 21-30. 2002.

MITANI, N.; MA, J. F. Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 56, n. 1, p. 1255-1261, 2005.

MEUER, Egon José. **Fundamentos de química do solo**. 5 ed. Porto Alegre: ECANGRAF, 2012. 280 p.

NASCIMENTO, C. W. A. do; CUNHA, K. P. V.; RODRIGUES, F. A. Silício e tolerância de plantas a metais pesados e doenças. In: RIBEIRO, M. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciências do solo, 2009, v.6, p. 273-318.

PATI, S.; PAL, B.; BADOLE, S.; HAZRA, G.C.; MANDAL, B. Effect of silicon fertilization on growth, yield, and nutrient uptake of rice. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v.47, n.3, p.284-290, 2016.

POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A.; BOTELHO, D. M. D. S. Silicon in plant disease control. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 62, n. 3, p. 323-331, 2015.

PRADO, R. de M.; FERNANDES, F. M. Eficiência da escória de siderurgia em Areia Quartzosa na nutrição e na produção de matéria seca de cana-de-açúcar cultivada em vaso. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 18, n. 4, 2000.

PRAKASH, N.B.; ANITHA, M.S.; SANDHYA, K. Behaviour of Different Levels and Grades of Diatomite as Silicon Source in Acidic and Alkaline Soils. **Silicon**, Netherlands, p.1-9, 2016.

SAUER, D.; SACCONI, L.; CONLEY, D. J.; HERRMANN, L.; SOMMER, M. Review of methodologies for extracting plant-available and amorphous Si from soils and aquatic sediments. **Biogeochemistry**, Netherlands, v. 80, n. 1, p. 89-108, 2006.

SAVANT, N. K.; KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Silicon nutrition and sugarcane production: a review. **Journal of Plant Nutrition**, Weinheim, v. 22, n. 12, p. 1853-1903, 1999.

SILVA, A. G.; BARRETO, A. C.; JUNIOR, L. R.; CUENCA, M. A.; FERNANDES, M. F.; GALINA, M. H.; DA SILVA, M. A.; CRUZ, A. S.; RESENTE, R. S.; IVO, W. M. Delimitação de área de atuação da Embrapa Tabuleiros Costeiros. **Embrapa Tabuleiros Costeiros**. Aracaju – SE, 2014. 29 p.

SOUZA, G. P., FILGUEIRA, M.; ROSENTHAL, R.; HOLANDA, J. N. F. Characterization of natural diatomaceous composite material. **Cerâmica**, v. 49, n. 309, p. 40-43, 2003.

SNYDER, G. H. Methods for silicon analysis in plants, soils, and fertilizers. In: **Studies in Plant Science**. Elsevier, Amsterdam, 2001. p. 185-196.

WEDEPOHL, K. H. The composition of the continental crust. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Washington, n. 59, 1217-1232, 1995.

XU, G.; ZHAN, X.; LI, C.; BAO, S.; LIU, X.; CHU, T. Assessing methods of available silicon in calcareous soils. **Communications in soil science and plant analysis**, New York, v. 32, n. 5-6, p. 787-801, 2001.



### 3. EXTRATORES NA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE SILÍCIO PARA CANA-DE-AÇÚCAR

#### RESUMO

A avaliação da disponibilidade do Si no solo e sua importância na nutrição mineral das plantas apresenta grande dificuldade pela falta de correlação dos métodos de extração de Si com a absorção pela planta e a produtividade, representando um fator limitante para ajustar as recomendações da fertilização com Si. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de quatro extratores (ácido acético  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ,  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ,  $\text{KCl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$  e água destilada) em 56 amostras de solos com teores variados de argila e coletados em áreas sob cultivo de cana de açúcar nos estados de Pernambuco e Paraíba. Em cada área de amostragem também foram coletadas 10 folhas diagnose +3, que foram misturadas para formar uma amostra composta. Foram determinados os teores disponíveis de Si com cada extrator e os teores de Si na folha. Correlações lineares foram realizadas entre os teores disponíveis de Si no solo por cada extrator e os teores de argila, óxidos de Fe e de Al, além dos teores de Si nas plantas de cana-de-açúcar das áreas de coleta. Os resultados mostraram que o ácido acético extraiu maiores quantidades de Si em todos os solos estudados. As extrações do Si tiveram correlações positivas com os teores de Argila e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , quando foram utilizados o  $\text{CaCl}_2$  e ácido acético. As melhores correlações do Si disponível no solo com os teores de Si na planta, foram obtidos quando foi utilizado o  $\text{CaCl}_2$  para a maioria dos solos avaliados.

**Palavras chaves:** Si disponível. Adsorção de Si. Cana-de-açúcar.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .  $\text{Al}_2\text{O}_3$

## EXTRACTORS IN THE EVALUATION OF SILICON AVAILABILITY FOR SUGARCANE

### ABSTRACT

The evaluation of the availability of Si in soil and its importance in the mineral nutrition of the plants presents great difficulty due to the lack of correlation of the methods of Si extraction with the absorption by the plant and the productivity, representing a limiting factor to adjust the recommendations of the fertilization with Si. The objective of this work was to evaluate the efficiency of four extractors (acetic acid  $0.5 \text{ mol L}^{-1}$ ,  $\text{CaCl}_2$   $0.01 \text{ mol L}^{-1}$ , KCl  $1 \text{ mol L}^{-1}$  and distilled water) in 56 soil samples with varied contents of clay and collected in areas under sugarcane cultivation in the states of Pernambuco and Paraíba. In each sampling area, 10 diagnostic sheets +3 were also collected and mixed to form a composite sample. The available levels of Si with each extractor and Si contents in the sheet were determined. Linear correlations were made between the available levels of Si in the soil by each extractor and the contents of clay, Fe and Al oxides, as well as Si contents in the sugarcane plants of the collection areas. The results showed that acetic acid extracted higher amounts of Si in all studied soils. The extractions of the Si had positive correlations with the contents of clay and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , when  $\text{CaCl}_2$  and acetic acid were used. The best correlations of available Si in the soil with the levels of Si in the plant were obtained when the  $\text{CaCl}_2$  was used for the majority of soils evaluated.

**Keywords:** Si available. Adsorption of Si. Sugarcane.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .  $\text{Al}_2\text{O}_3$

### 3.1. INTRODUÇÃO

O silício é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, as pesquisas sobre este elemento na agricultura têm aumentado nas últimas décadas, devido aos efeitos benéficos da aplicação de Si sobre a resistência a estresses bióticos e abióticos nas plantas (GUNTZER; KELLER; MEUNIER, 2012; CRUSCIOL et al., 2014; LIANG et al., 2015) e ao incremento da produtividade, principalmente nas espécies acumuladoras de Si, tais como a cana-de-açúcar (SAVANT et al., 1999). Embora o Si não seja considerado ainda um nutriente, ele é absorvido e acumulado em algumas espécies de plantas em concentrações semelhantes ou superiores à dos macronutrientes (KEEPING, 2017; ETESAMI, RYONG, 2018). Nas plantas cultivadas, o Si encontra-se em concentrações que varia de 0,1 a 10% (ELMER; DATNOFF, 2014).

No solo, o Si pode estar presente nas formas de Si solúvel ( $\text{Si(OH)}_4$ ), presente na solução do solo; Si adsorvido/precipitado nos óxidos de Fe e Al; e como constituinte de minerais silicatados na forma cristalina ou amorfa (SOMMER et al., 2006; KELLER et al., 2012; HAYNES, 2014). Nos solos tropicais intemperizados, o Si encontra-se principalmente adsorvido de forma específica nos sesquióxidos de Fe e Al, e, desta forma, os solos apresentam baixa disponibilidade de Si para as plantas (HALLMARK; WILDING; SMECK, 1984; PEREIRA et al. 2007; CRUSCIOL et al., 2018). Em solos arenosos, o Si encontra-se presente principalmente no quartzo, mineral caracterizado por possuir alta estabilidade (MEUER, 2012). O Quartzo apresenta estrutura bem ordenada com solubilidade muito baixa de Si (3 a 7 mg Si  $\text{L}^{-1}$ ) (SAVANT et al., 1999), gerando no solo uma baixa disponibilidade de Si às plantas.

O Si disponível às plantas é representado pelo ácido monossilício  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  ou  $\text{Si(OH)}_4$  (TUBANA; BABU; DATNOFF, 2016). Naturalmente, o Si da solução do solo pode ser originado da dissolução dos minerais silicatados primários, minerais secundários e silicatos amorfos (HAYNES, 2014). A solubilidade dos minerais é fortemente dependente do pH, sendo mais altas em pH ligeiramente baixo e diminuem progressivamente até um pH de 9,8 (HAYNES 2014; KEEPING, 2017). A composição mineralógica do solo juntamente com a textura são os principais fatores que influenciam na solubilidade de Si (FREITAS et al., 1977; MEYER; KEEPING, 2001). O Si da solução do solo pode ser adsorvido fortemente na superfície dos óxidos de Fe/Al, precipitado na forma de sílica amorfa; formar argilominerais secundários; ser perdido por lixiviação e ser absorvido pelas plantas (KELLER et al., 2012). A quantidade de Si disponível na solução do solo é diretamente dependente da estabilidade dos minerais da fase sólida, ou seja, existe uma correlação positiva entre os teores do elemento e os teores de argila no material coloidal (MEYER; KEEPING, 2001).

Vários extratores de Si são estudados para avaliar a disponibilidade de Si, porém, nenhum deles foi eficaz em todos os tipos de solos porque as quantidades de Si variam dependendo do tipo de extrator usado (SNYDER, 2001; BABU et al., 2016). Existem várias soluções extratoras utilizados para avaliar o Si solúvel que podem ser classificadas como ácidas, neutras ou tamponadas.

No primeiro caso, encontra-se HCl diluído, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluído, acetato de amônio (pH 4,8), oxalato de amônio (pH 3,0), solução de ácido cítrico, ácido acético 0,05 mol L<sup>-1</sup>, fosfato diluído (pH 3,5); dentre as neutras, pode-se mencionar Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> solução CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, tampão acetato de sódio (pH 4,0), tampão fosfato de sódio (pH 6,2), e outros. A água também é utilizada como extrator (GUTIERREZ; INOCÊNCIO; NOVELINO, 2011; HAYNES, 2014; LIANG et al., 2015). As soluções extratoras ácidas são consideradas as mais efetivas que as soluções neutras, porém, podem superestimar os teores de Si solúvel (XU et al., 2001; GUTIERREZ et al., 2011; ABE et al., 2016). A escolha do extrator geralmente é baseada em sua facilidade de adoção e sua adequação para características específicas do solo, e será refletido em sua capacidade de se correlacionar com a absorção de Si da planta.

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com área plantada de 9 milhões de hectares (CONAB, 2019). A participação da cadeia produtiva da cana-de-açúcar foi de 0,40% do PIB brasileiro do primeiro semestre do 2017 (CEPEA, 2019), sendo considerado um cultivo de grande importância na economia do país. A cana de açúcar é considerada planta acumuladora de Si, portanto, o seu rendimento pode ser reduzido pelo manejo intenso e pelo monocultivo, que extrai quantidades significativas dos solos (KORNDÖRFER; PEREIRA; CAMARGO, 2002). Neste contexto, este trabalho teve por objetivo avaliar a eficiência da avaliação de Si disponível por quatro extratores (ácido acético 0,5 mol L<sup>-1</sup> e o CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e água destilada) em 56 amostras de solos sob cultivo de cana-de-açúcar nos solos de tabuleiros costeiros dos estados de Pernambuco e Paraíba.

## **3.2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.2.1. Área de estudo e amostragem de solos e plantas**

Os locais de amostragem compreenderam 56 áreas produtoras de cana-de-açúcar com um longo histórico de cultivo, localizadas nas mesorregiões da Zona da Mata Pernambucana e Paraíba, Nordeste brasileiro. A região apresenta precipitação e temperatura média anual de

1600 mm e 24°C, respectivamente (INMET, 2016); os solos são predominantemente classificados como Argissolos (EMBRAPA, 2000).

As amostras de solos foram coletadas na profundidade de 0,0-0,2 m em cada local, 10 amostras simples de solos foram coletadas e misturadas para formar uma amostra composta. Os solos foram secos, destorroados e passados em peneira de malha de 2 mm. Com relação às plantas, em cada área de amostragem foram coletadas 10 folhas diagnose +3, de plantas com cinco meses de idade, que foram misturadas para formar uma amostra composta. As folhas foram lavadas com água destilada e o terço médio da folha, sem a nervura central, foi separado para análise. O material vegetal foi seco em estufa a 65°C, até peso constante, e posteriormente triturado em moinho de facas tipo Wiley.

### **3.2.2. Análise de Si solúvel no solo**

O Si solúvel no solo foi extraído utilizando quatro extratores, que são comumente usados no Brasil na relação solo:solução de 1:10 e agitados por 1h a 45 rpm, com cada extrator. À sub amostras de 10,0 dm<sup>3</sup> de solo foram adicionados 100 mL de uma das seguintes soluções extratoras: cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>) 0,01 mol L<sup>-1</sup>; ácido acético (HC<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>2</sub>) 0,5 mol L<sup>-1</sup>; cloreto de potássio (KCl) 1 mol L<sup>-1</sup>; e água destilada. Após agitação, os extratos foram filtrados e permaneceram em repouso por > 12h (Tabela 1). O CaCl<sub>2</sub> e o ácido acético foram selecionados para o estudo por serem comumente recomendados para análise de Si solúvel no solo (KORNDÖRFER, PEREIRA, NOLLA, 2004a); o KCl é rotineiramente usado nos laboratórios de fertilidade do solo para avaliação de Ca, Mg e Al (EMBRAPA, 2013) e pode ter seu extrato otimizado para medição do Si; por fim, a água é considerada um extrator universal (RAI; CAMARGO, 1973) e pode representar uma opção de baixo custo para extração de Si do solo.

Para determinação do Si, alíquotas de 10 ml dos extratos foram pipetadas e colocadas em copos plásticos de 50 ml. Adicionou-se 1 ml de sulfo-molibdica (7,5 g L<sup>-1</sup>) para formar o complexo silício-molibdato de coloração amarela; decorrido dois minutos acrescentou-se 2 ml de ácido tartárico (200 g L<sup>-1</sup>) para eliminar a interferência do P e Fe na determinação; e após 5 minutos adicionou-se 10 mL<sup>-1</sup> de ácido ascórbico (3 g L<sup>-1</sup>) com a finalidade de transformar o complexo para a coloração azul. As determinações dos extratos foram realizadas em espectrofotômetro UV-visível, no comprimento de onda de 660 nm (KORNDÖRFER; PEREIRA; NOLLA, 2004a).

### 3.2.3. Análise do Si total na planta

A extração e determinação do Si no material vegetal foram realizadas segundo a metodologia descrita por Korndörfer, Pereira e Nolla. (2004). Pesou-se 0,100 g do material vegetal em tubo de centrífuga de 50 ml, foram adicionados 2 mL de  $\text{H}_2\text{O}_2$  (500 g  $\text{L}^{-1}$ ) e 3 ml de NaOH (500 g  $\text{L}^{-1}$ ); o conjunto foi levado a banho maria por 1h a 75 °C. Posteriormente, os tubos foram para a autoclave a 123 °C e 1,5 atm por 1h. Por fim, acrescentou-se 45 ml de água destilada, com o material permanecendo em repouso por mais de 12h. Alíquotas de 1 ml dos extratos foram diluídas em 20 ml com água destilada, depois adicionou-se 1 ml de HCl 500 g  $\text{L}^{-1}$  + 2 ml de molibdato de amônio 100g  $\text{L}^{-1}$  para a formação do complexo silício-molibdico de coloração amarela. Decorridos quatro minutos, adicionaram-se 2 ml de ácido oxálico 75 g  $\text{L}^{-1}$  para eliminar a interferência de P e Fe. As determinações foram realizadas em espectrofotômetro UV-visível no comprimento de onda de 410 nm.

### 3.2.4. Granulometria e teores de óxidos de Fe, Al e Si no solo

A análise granulométrica foi realizada pelo método do densímetro de Bouyoucos. Os óxidos de Fe, Al e Si no solo foram extraídos pela metodologia proposta Mehra e Jackson (1960). Pesou-se 2,00 g de solo em tubos de centrífuga de 50 ml. Foram adicionados 20 ml da solução citrato de sódio 0,25 mol  $\text{L}^{-1}$  e bicarbonato de sódio 0,11 mol  $\text{L}^{-1}$ ; mais 1g de ditionito de sódio. Posteriormente foram colocados em banho maria por 30' e depois centrifugado a 4000 rpm por 30'. O sobrenadante foi filtrado e o volume aferido em balão de 50 ml. O procedimento foi repetido por duas vezes e os sobrenadantes combinados. Os teores de Fe, Al e Si nos extratos foram determinados em ICP-OES.

### 3.2.5. Análises estatísticas

O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado, com todas as análises sendo realizadas em triplicata par cada uma das 56 amostras extraídas com cada um dos 4 extratores. Os valores da média, mediana, mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação foram calculados para o conjunto dos dados. A normalidade dos dados foi testada pelo teste Shapiro-Wilk ( $p < 0,05$ ) e, quando necessário, transformações logarítmicas e raiz quadrada foram realizadas no conjunto dos dados. Os dados foram submetidos à ANOVA ( $p < 0,05$ ) e os valores médios foram comparados pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Correlações lineares de Person ( $p < 0,05$ ) foram realizadas entre os teores solúveis de Si no solo e os teores

de argila; dos óxidos de Fe, Al e Si; e os teores totais de Si na planta de cana-de-açúcar. Todo procedimento estatístico foi realizado utilizando o software STATISTICA (v. 10).

### 3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.3.1. Análise do solo e teores médios de Si extraído.

Os teores de argila, silte e areia apresentaram elevada variação, devido às características granulométricas dos principais solos presentes, que variam de franco-argiloso até arenoso, nos lugares de amostragem como os Argissolos e Neossolo Quartzarênico, sendo o segundo com maior presença nos tabuleiros costeiros do estado da Paraíba. Os valores de pH foram ácidos para a maioria das amostras, variando de 4,3 a 6,6, com pH da maioria das amostras em torno de 5,4. Os teores de matéria orgânica variaram de baixa a média (7,9 a 68,1 g kg<sup>-1</sup>), no entanto para a maioria dos solos foi baixa (19 g kg<sup>-1</sup>), característico dos solos avaliados (Tabela 1).

Tabela 1. Estatística descritiva das análises químicas-físicas das amostras de solos sob cultivo de cana-de-açúcar e dos teores de silício total na folha diagnose +3 da cana-de-açúcar

	Média	Mediana	Min.	Máx.	±DP	CV (%)	S-W test
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	195.7	176.6	19.9	450.4	125.6	64.2	0.0112
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	135.8	89.5	8.0	491.8	130.8	96.3	0.0000
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	668.5	695.2	138.6	966.0	222.0	33.2	0.0036
pH (água)	5.4	5.4	4.3	6.6	0.5	9.9	0.5324
MOS (g kg <sup>-1</sup> )	24.7	19.9	7.9	68.1	12.7	51.4	0.0000
Si (CaCl <sub>2</sub> ) (mg dm <sup>-3</sup> )	4.8	3.8	0.4	18.2	3.9	80.4	0.0000
Si (AA) (mg dm <sup>-3</sup> )	8.8	7.0	0.0	24.6	6.9	78.6	0.0036
Si (KCl) (mg dm <sup>-3</sup> )	3.5	2.8	0.5	12.2	2.8	77.7	0.0001
Si (H <sub>2</sub> O) (mg dm <sup>-3</sup> )	6.5	6.1	1.0	16.5	3.6	55.1	0.0976
Si <sub>planta</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	8.3	6.6	3.3	21.1	4.6	55.1	0.0000
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.1	2.0	0.1	25.7	5.2	129.0	0.0000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.5	0.3	0.1	3.6	0.7	128.5	0.0000

*Min* mínimo, *Max* máximo, *DP* desvio padrão, *CV* coeficiente de variação, *S-W test* teste de normalidade Shapiro-Wilk ( $p < 0.05$ ), *MOS* matéria orgânica do solo, *Si (H<sub>2</sub>O)* silício solúvel no solo extraído com água destilada, *Si (CaCl<sub>2</sub>)* silício solúvel no solo extraído com CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, *Si (AA)* silício solúvel no solo extraído com ácido acético 0,5 mol L<sup>-1</sup>, *Si (KCl)* silício solúvel no solo extraído com KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e *Si<sub>planta</sub>* silício total na folha diagnose da cana-de-açúcar.

Adicionalmente, na tabela observa-se que os valores máximos e da média dos teores de Si disponível no solo foram obtidos com o extrator ácido acético, porém apresenta também

maior variação o que poderia ser produto da variação da granulometria do solo. Os valores mínimos foram zero para os quatro extratores (Tabela 1). Na Tabela observa-se também que os menores teores de Si disponível foram obtidos quando utilizado o extrato KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e a menor variação foi encontrada com a água.

Os maiores teores de Si solúvel extraído com o ácido acético é possível devido a que os extratores ácidos poderiam ter a capacidade de superestimar os teores de Si solúvel por sua capacidade de dissolver silício não disponível (LIANG et al., 1994; LIANG et al., 2015; ABE; YAMASAKY; WAKATSUKI, 2016) e gera a dissolução de compostos amorfos hidróxidos e óxidos de Fe e Al amorfos, aluminossilicatos cristalinos amorfos e altamente solúveis, superestimando assim o teor de silício disponível (SAUER et al., 2006; HÖHN et al., 2008; HAYNES, 2014).

Pesquisas realizadas por Camargo et al. (2005), Gutierrez, Inocêncio e Novelino (2011) e Crusciol et al. (2018), encontraram maiores teores de Si disponível em solos de textura argilosa do que em solos de textura franca independentemente do extrator utilizado. Estes autores inferiram que estes resultados poderiam ser devido ao solo arenoso apresentar menores teores de Si prontamente disponível. A baixa disponibilidade de Si nos solos arenosos poderia ser pela presença de quartzo que é um material que apresenta elevada estabilidade (DEMATTE et al., 2011; MEUER, 2012).

O CaCl<sub>2</sub> foi o segundo extrator em extrair teores de Si mais baixos depois do KCl. Este extrator é uma solução salina que possui uma força iônica semelhante à da solução do solo, evitando a dispersão e favorecendo a floculação do Si coloidal (INOCÊNCIO; GUTIERREZ; NOVELINO, 2010, LIANG et al., 2015). Por tanto, os teores de Si extraído com esta solução pode corresponder mais de perto os níveis de Si disponível no solo (LIANG et al, 2015). Possivelmente o KCl pode cumprir a mesma função. A água, por sua parte, também usado como extrator, que pode extrair quantidades diferentes dos presentes na solução porque gera dispersão quando a força iônica é diminuída (LINDSAY, 1979; HAYNES, 2014).

### **3.3.2. Correlação entre o Si disponível e os teores de Argila**

Foram encontrados Correlações positivas e significativas entre os teores de Argila o os teores de Si disponível no solo (Figura 1). Nesta figura observa-se a extração com água foi superior (0,69), porém não teve diferença marcada com o Si disponível extraído com os demais extratores. Com este resultado fica demonstrado que a água pode ser um excelente extrator porque extrai quantidades diferentes dos presentes na solução do solo devido a sua força iônica

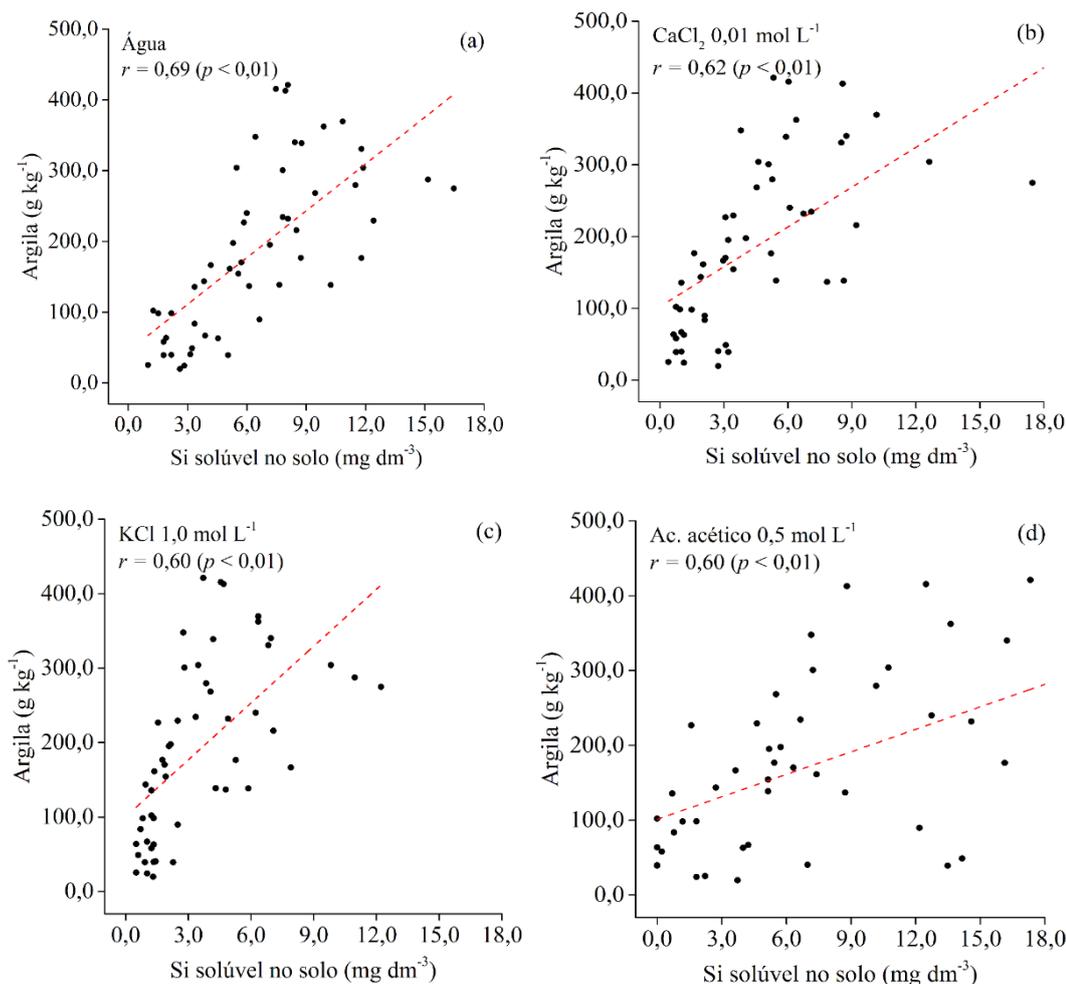
(HAYNES, 2014). Resultados semelhantes foram encontrados por Raij e Camargo (1973), os quais observaram que a água não é influenciada pelos óxidos principalmente em solos argilosos, por tanto tem a capacidade de extrair consideráveis de Si.

Embora a água pode ser um bom extrator de Si disponível, apresenta o inconveniente de dispersar a argila, exigindo centrifugação a altíssima velocidade para a separação dos extratos ou floculação e separação da argila antes de determinação da sílica (RAIJ; CAMARGO, 1973)

Em geral, na figura 1, também pode-se observar que os extratores água,  $\text{CaCl}_2$  e ácido acético extraíram quantidades parecidas de Si disponível. O KCl foi o extrator que menos Si disponível extraiu, porém apresenta elevada correlação, o que pode ser um indicativo da eficiência na extração de Si, no entanto seja pouco estudado e utilizado nas pesquisas como solução para extrair Si disponível no solo.

O ácido acético consegue extrair maiores quantidades de Si disponível, principalmente em solos com elevados conteúdos de argila, é possível de uma superestimação dos teores de Si disponível às plantas, o que é evidenciado numa menor correlação.

Korndörfer, Pereira e Camargo (2004b) testaram diferentes extratores para extrair si disponível em solos cultivados com arroz e Crusciol et al. (2018) em solos cultivados com cana-de-açúcar, encontraram que o ácido acético extraiu maiores quantidades de Si disponível, principalmente em solos argilosos.



**Figura 1.** Relação entre os teores de argila e os teores de Si solúvel em solos cultivados com cana-de-açúcar. Os teores de Si no solo foram extraídos com água destilada (a),  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol L<sup>-1</sup>, KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> e ácido acético 0,5 mol L<sup>-1</sup>. A linha tracejada indica a relação entre as variáveis.  $R$  indica o coeficiente de relação linear de Pearson, o valor de  $p$  indica a significância da correlação entre as variáveis de acordo com a ANOVA.

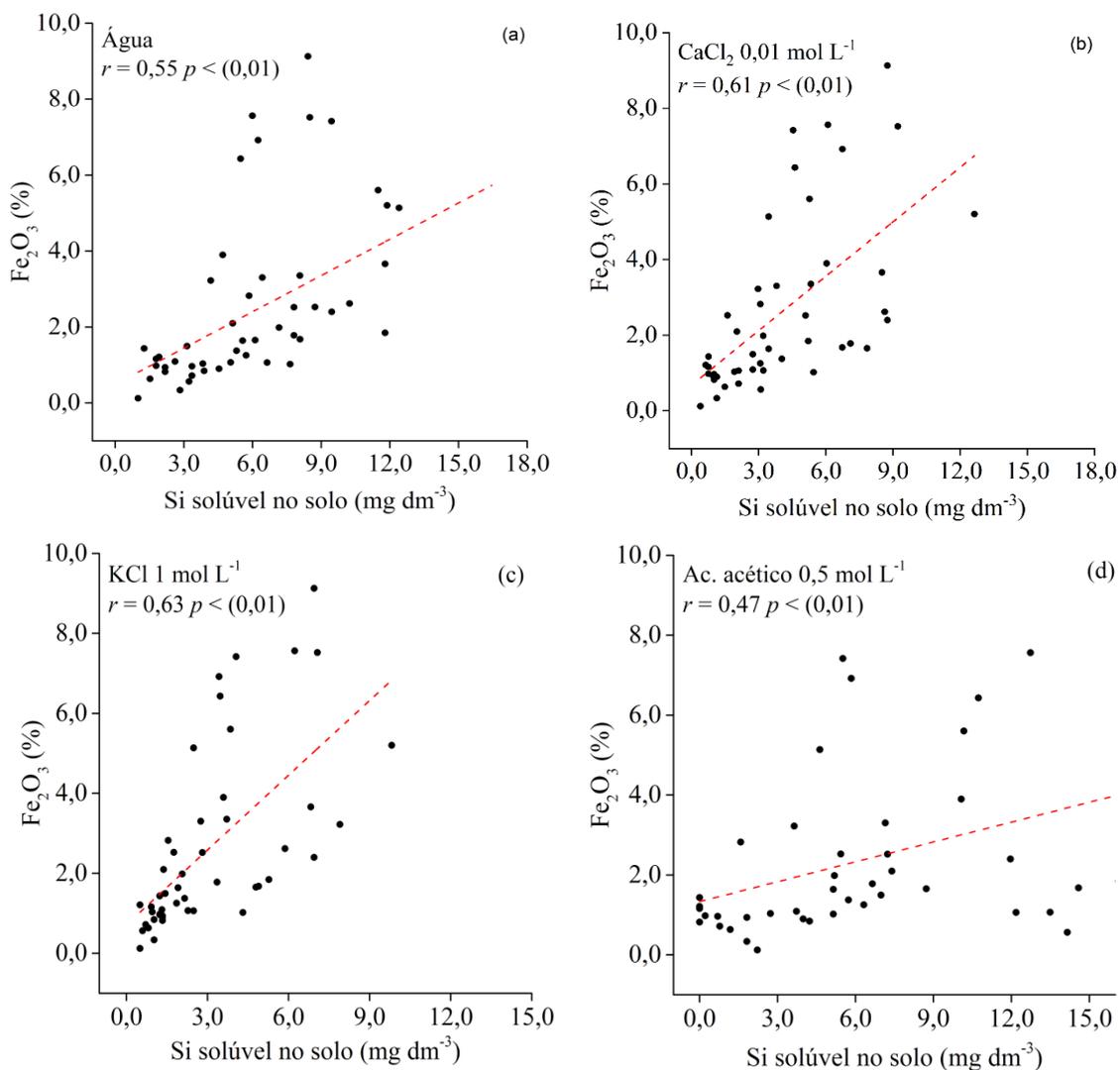
### 3.3.3. Correlação entre o Si disponível e os teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3$

Correlações positivas e significativas foram encontradas na correlação de Si disponível no solo e os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  para todos os extratores testados (Figura 2). Os extratores KCl e  $\text{CaCl}_2$  obtiveram melhores correlações, 0,63 e 0,6 respectivamente. O KCl foi o extrator que menor teor de Si extraiu para todos os diferentes solos analisados, porém apresenta a melhor correlação, o que poderia ser um indicativo de ser um extrator altamente eficiente para solos com diferentes teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

A maior eficiência dos extratores básicos, KCl e CaCl<sub>2</sub>, os quais apresentam mecanismos parecidos de extração, corrobora o fato de que ambos extratores conseguem extrair Si principalmente da solução do solo, e em menor grau, Si fracamente adsorvido na fase sólida do solo. O CaCl<sub>2</sub> possui uma força iônica semelhante à da solução do solo, evitando a dispersão e favorecendo a extração de Si, a diferencia do ácido acético, além de apresentar a vantagem de não sofrer interferência do calcário recentemente aplicado ao solo (KORNDÖRFER et al., 1999; HAYNES, 2014; SAUER et al., 2006; HÖHN et al., 2008).

Na mesma figura observa-se também que o ácido acético o extrator que conseguiu extrair maiores teores de Si do solo, porém sua correlação com os óxidos de ferro foi a mais baixa. Este resultado demonstra que principalmente em solos argilosos e recentemente corrigidos, poderia estar influenciado pelas variações do pH do solo, que é altamente dependente influenciado correção da acidez e pode levar a uma superestimação do Si disponível às plantas. (HAYNES, 2014; HÖHN et al., 2008).

Em geral, as soluções ácidas são consideradas as mais efetivas por diversos pesquisadores, embora possam superestimar os níveis de Si disponível. Estes extratores podem gerar a dissolução de compostos amorfos hidróxidos e óxidos de Fe e Al amorfos, aluminossilicatos cristalinos amorfos e altamente solúveis, superestimando assim o Si disponível do solo. (GUTIERREZ; INOCÊNCIO; NOVELINO, 2011; ABE; YAMASAKI; WAKATSUKI, 2016; XU et al., 2001).



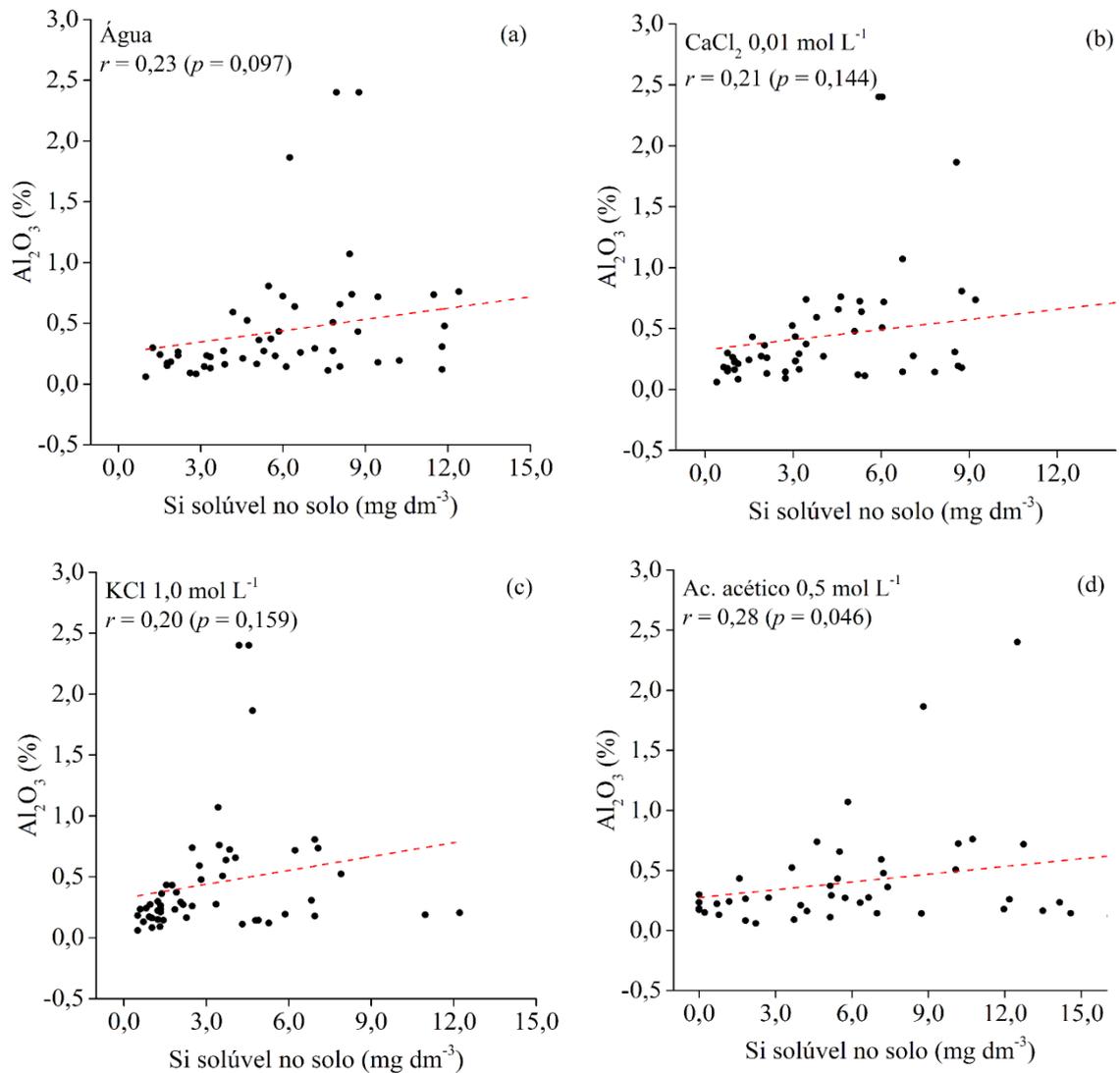
**Figura 2.** Relação entre os teores óxido de ferro e os teores de Si solúvel em solos cultivados com cana-de-açúcar. Os teores de Si no solo foram extraídos com água destilada (a),  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ,  $\text{KCl}$   $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  e ácido acético  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ . A linha tracejada indica a relação entre avariáveis.  $R$  indica o coeficiente de relação linear de Pearson, o valor de  $p$  indica a significância da correlação entre as variáveis de acordo com a ANOVA.

### 3.3.4. Correlação entre o Si disponível e os teores de $\text{Al}_2\text{O}_3$

Não foram encontradas correlações significativas entre o Si disponível no solo e os teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Figura 3). Estes resultados indicam que o óxidos e ferro não é um bom indicativo para estimar os teores de Si disponível para os solos estudados.

Estes resultados evidenciam que nem todos os solos com maiores teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e/ou  $\text{Al}_2\text{O}_3$  apresentam maiores teores de Si solúvel. Isto é porque o teor de Si solúvel também pode estar associado ao tipo de solo, teor de matéria orgânica, tipo de argila, pH, entre outros, e não apenas ao teor de argila ou óxidos no solo (CRUSCIOL et al., 2018). Além disso, existem

diferenças mineralógicas entre solos altamente intemperizados, principalmente em relação à quantidade de óxidos, oxi-hidróxidos e minerais silicatados (SOARES et al., 2005; ALVES, OMOTOSO, 2009; CAMARGO; ROCHA; KORNDÖRFER, 2013).



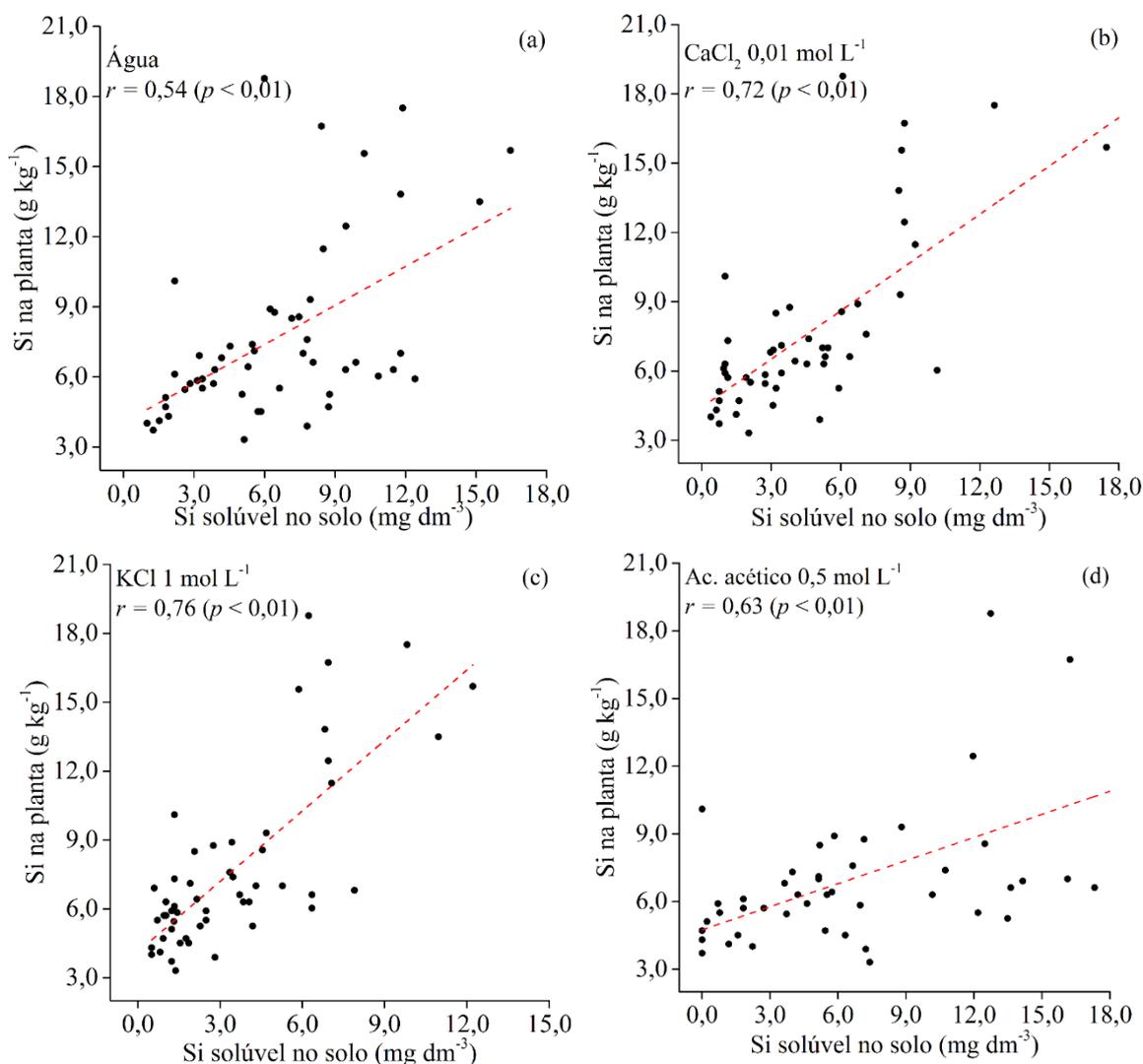
**Figura 3.** Relação entre os teores de óxidos de alumínio e os teores de Si solúvel em solos cultivados com cana-de-açúcar. Os teores de Si no solo foram extraídos com água destilada (a), CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> e ácido acético 0,5 mol L<sup>-1</sup>. A linha tracejada indica a relação entre avariáveis.  $r$  indica o coeficiente de relação linear de Pearson, o valor de  $p$  indica a significância da correlação entre as variáveis de acordo com a ANOVA.

### 3.3.5. Correlações entre o Si disponível e o Si absorvido pela cana-de-açúcar

Em quanto as gráficas de correlações entre os teores de Si solúvel e o Si absorvido pela planta de cana-de-açúcar mostradas na figura 4, houve correlação positiva e significativa para os quatro extratores testados. Os melhores valores de correlação foram obtidos por o KCl (0,76) e CaCl<sub>2</sub> (0,72). Este resultado evidencia que estes extratores poderiam ser considerados eficientes neste tipo de solos. As soluções extratoras tendem a solubilizar Si em diferentes componentes da matriz do solo, e as soluções salinas, como o CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> e o KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>, extraem principalmente o conteúdo de Si disponível na solução do solo (CROOKS; PRENTICE, 2016).

Por outro lado, a água e o ácido acético, não apresentaram coeficientes de correlação mais baixos, embora tenham extraído maiores quantidades de Si disponível nos solos cultivados com cana-de-açúcar. Este resultado poderia explicar que o ácido acético pode solubilizar parte do Si lábil adsorvido por Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e o Si prontamente disponível (CRUSCIOL et al., 2018).

Depois do KCl, o CaCl<sub>2</sub> foi quem apresentou a melhor correlação, é motivo pelo qual, é o extrator padrão no Brasil (KORNDÖRFER et al., 2004b). Segundo Lima Filho et al. (1999), o CaCl<sub>2</sub> extrai pequenas quantidades de Si do solo, porém pode estimar melhor o Si disponível na solução do solo, principalmente em solos recentemente corrigidos e solos arenosos, mostrando que este extrator é eficiente na avaliação do Si disponível para a cana-de-açúcar. Berthelsen et al. (2003) relataram que o conteúdo de Si na cana-de-açúcar estava significativamente relacionado ao Si do solo prontamente solúvel extraído por CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, mas a correlação foi menor quando foi utilizado ácido acético.



**Figura 4.** Relação entre o Si absorvido pela cana-de-açúcar e os teores de Si solúvel em solos cultivados com cana-de-açúcar. Os teores de Si no solo foram extraídos com água destilada (a),  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ,  $\text{KCl}$   $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  e ácido acético  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ . A linha tracejada indica a relação entre as variáveis.  $r$  indica o coeficiente de relação linear de Pearson, o valor de  $p$  indica a significância da correlação entre as variáveis de acordo com a ANOVA.

### 3.4. CONCLUSÃO

O  $\text{KCl}$   $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ , foi o extrator que apresentou melhores correlações, principalmente em relação ao Si absorvido pela planta, embora seja um extrator pouco utilizado para determinar Si no solo e precisa ser tomado em conta. O ácido acético pelo contrário, extraiu maiores teores de Si, no entanto apresentou baixas correlações, por tanto neste trabalho queda evidenciado que não representa uma alternativa confiável para determinar o Si em solos cultivados com cana-de-açúcar nas áreas avaliadas.

## REFERÊNCIAS

- ABE, S. S.; YAMASAKI, Y.; WAKATSUKI, T. Assessing silicon availability in soils of rice-growing lowlands and Neighboring uplands in Benin and Nigeria. **Rice Science**, Hangzhou, v. 23, n. 4, p. 196-202, 2016.
- ALVES, M. E.; OMOTOSO, O. Improving Rietveld-based clay mineralogic quantification of Oxisols using Siroquant. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, n. 6, p. 2191-2197, 2009.
- BERTHELSEN, S.; NOBLE, A. D.; KINGSTON, G.; HURNEY, A.; RUDD, A.; GARSIDE, A. Improving yield and ccs in sugarcane through the application of silicon based amendments. **Final report on SRDC Project CLW009**, 2003.
- CAMARGO, M.S. de; ROCHA, G.; KORNDÖRFER, G.H. Silicate fertilization of tropical soils: silicon availability and recovery index of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.5, p.1267-1275, 2013.
- CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; CORRÊA, G. F.; PEREIRA, H. S.; BARBOSA, D. S.; RESENDE, R. H. Soluble silicon extractants in soils: lime and phosphorus influence. **Bioscience Journal**, Uberlandia, v. 21, n. 2, p. 9-19, 2005.
- CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Brasília: Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, 2016. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 28 ene. 2019.
- CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **PIB do agronegócio brasileiro de 1996 a 2018**. consultado em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-de-cadeias-agropecuarias.aspx>. Acesso em: 11 Jan. 2019.
- CROOKS, R.; PRENTICE, P. Extensive investigation into field based responses to a silica fertiliser. **Silicon**, Netherlands, v.9, n.2, p.301-304, 2017.
- CRUSCIOL C. A. C.; ARRUDA D. P.; FERNANDES A. M.; ANTONANGELO J. A.; LUÍS REYNALDO F. A.; NASCIMENTO C. A. C.; OTÁVIO R. B.; MCCRAY J. M. Methods and extractants to evaluate silicon availability for sugarcane. **Scientific Reports**, London, v. 8, n. 1, p. 916, 2018.
- CRUSCIOL, C. A. C.; FOLTRAN, R.; ROSSATO, O. B.; MCCRAY, J. M.; BROSSETTO, R. Effects of surface application of calcium-magnesium silicate and gypsum on soil fertility and sugarcane yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 1843-1854, 2014.
- DEMATTÊ, J. L.; PAGGIARO, C. M.; BELTRAME, J. A.; RIBEIRO, S. S. Uso de silicatos em cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, Georgia, v. 133, p. 7-12, 2011.
- ELMER, W. H.; DATNOFF, L. E. Mineral nutrition and suppression of plant disease. In **Encyclopedia of agriculture and food systems**. (Ed.). N. Van Alfen. San Diego: Elsevier, 2014. p. 231-244

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.

ETESAMI, H.; JEONG, B. R. Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology and environmental safety**, New York, v. 147, p. 881-896, 2018.

FREITAS, L. C.; COSTA FILHO, J. F.; ALOISI, R. R.; MELO, W. J. Contribution to the study of soluble silica in some soil profiles. **Científica**, Jaboticabal, v. 5, p. 296–305, 1977.

GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J-D. Benefits of plant silicon for crops: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 32, n. 1, p. 201-213, 2012.

GUTIERREZ, R. S.; INOCÊNCIO, M. F.; NOVELINO, J. O. Extraction of silicon in soils fertilized with phosphate and silicate. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 01-07, 2011.

HALLMARK, C. T.; WILDING, L. P.; SMECK, N. E. Silicon. *Methods of Soil Analysis. Chemical and Microbiological Properties*, 2 ed. Part 2. p. 263-273, 1984.

HAYNES, R. J. A. Contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 177, p. 831-844, 2014.

HÖHN, A.; SOMMER, M.; KACZOREK, D.; SCHALITZ, G.; BREUER, J. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 171, n. 3, p. 409-418, 2008.

INOCÊNCIO, M. F.; GUTIERREZ, R. S.; NOVELINO, J. O. Avaliação de métodos de extração de silício e fósforo em amostras de solos. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 4, p. 75-83, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa. 2016.

KEEPING, M. G. Uptake of silicon by sugarcane from applied sources may not reflect plant-available soil silicon and total silicon content of sources. **Frontiers in plant science**, Switzerland, v. 8, p. 760, 2017.

KELLER, C.; GUNTZER, F.; BARBONI, D.; LABREUCHE, J.; MEUNIER, J. D. Impact of agriculture on the Si biogeochemical cycle: input from phytolith studies. **Comptes Rendus Geoscience**, French, v. 344, n. 11-12, p. 739-746, 2012.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício no solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia GPSi-ICIAG-UFU, 2004a. 50 p. Boletim técnico 02.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura, 3. ed. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 2004b. 28p.

KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; CAMARGO, M.S de. Papel do silício na produção de cana-de-açúcar. **Revista STAB**, Piracicaba, v.21, n.1, p.6-9, 2002.

KORNDÖRFER, G. H.; COELHO, N. M.; SNYDER, G. H.; MIZUTANI, C. T. Avaliação de métodos de extração de silício para solos cultivados com arroz sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.101-106, 1999.

LIANG, Y.; NIKOLIC, M.; BÉLANGER, R.; GONG, H.; SONG, A. **Silicon in agriculture: From theory to practice**. Berlin: Springer, 2015. 255p.

LIANG, Y. C.; MA, T. S.; LI, F. J.; FENG, Y. J. Silicon availability and response of rice and wheat to silicon in calcareous soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 25, n. 13-14, p. 2285-2297, 1994.

LIMA FILHO, O. F.; LIMA, M. T. G.; TSAI, S. O silício na agricultura. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 87, p. 1-7, 1999.

LINDSAY W.L. 19. Chemical equilibria in soils. JohnWiley & Sons, New York, USA, 1979. 449 p.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite–citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: Clays and clay minerals. **Pergamon**, Oxford, v. 5, p. 317-327, 2013.

MEUER, Egon José. Fundamentos de química do solo. 5 ed. Porto Alegre: ECANGRAF, 2012. 280 p.

MEYER, J. H.; KEEPING, M. G. Past, present and future research of the role of silicon for sugarcane in southern Africa. In: **Studies in plant science**. Elsevier, 2001. p. 257-275.

PEREIRA, H. S.; BARBOSA, N. C.; CARNEIRO, M. A. C.; KORNDÖRFER, G. H. Evaluation of sources and extractors of silicon in the soil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 2, p. 239-247, 2007.

RAIJ, B. van; CAMARGO, O. A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, Campinas, 32, n. 3, p. 223-231, jun. 1973.

SAUER, D.; SACCONI, L.; CONLEY, D. J.; HERRMANN, L.; SOMMER, M. Review of methodologies for extracting plant-available and amorphous Si from soils and aquatic sediments. **Biogeochemistry**, Netherlands, v. 80, n. 1, p. 89-108, 2006.

SAVANT, N. K.; KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Silicon nutrition and sugarcane production: a review. **Journal of Plant Nutrition**, Weinheim, v. 22, n. 12, p. 1853-1903, 1999.

SOARES, M. R.; ALLEONI, L. R.; VIDAL-TORRADO, P.; COOPER, M. Mineralogy and ion exchange properties of the particle size fractions of some Brazilian soils in tropical humid areas. **Geoderma**, Netherlands, v. 125, n. 3-4, p. 355-367, 2005.

SOMMER, M.; KACZOREK, D.; KUZYAKOV, Y.; BREUER, J. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes: a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 169, n. 3, p. 310-329, 2006.

TUBANA, B. S.; BABU, T.; DATNOFF, L. E. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives. **Soil Science**, Engand, v. 181, n. 9/10, p. 393-411, 2016.

RAIJ, B. A. van; CAMARGO, O. A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, Campinas, v. 32, p. 223-236, 1973.

XU, G.; ZHAN, X.; LI, C.; BAO, S.; LIU, X.; CHU, T. Assessing methods of available silicon in calcareous soils. **Communications in soil science and plant analysis**, New York, v. 32, n. 5-6, p. 787-801, 2001.



#### 4. EFEITOS DA APLICAÇÃO DE DIATOMITA NA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA EM UM SOLO ARENOSO

##### RESUMO

A diatomita é uma fonte de silício biogênica, mais concentrada e de maior solubilidade em relação às outras fontes silicatadas, e, seu uso pode significativamente incrementar a produção e o status nutricional da cana-de-açúcar cultivada em solos arenosos deficientes em silício. Neste sentido, o presente trabalho teve por objetivos avaliar os efeitos do fertilizante silicatado amorfo, a base de diatomito, sobre (i) os teores de Si no solo e na planta; (ii) as propriedades físico-químicas do solo; e (iii) a produção de biomassa e a nutrição mineral da cana-de-açúcar. O experimento foi realizado em casa de vegetação utilizando a variedade de cana-de-açúcar RB061675 que foi cultivada em um Neossolo Quartzarênico. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com cinco doses de Si (75, 150, 225, 300 e 375 kg ha<sup>-1</sup>) mais o controle (sem adição de Si), com quatro repetições. A fonte foi um fertilizante granulado a base de diatomito, comercializado pela empresa Agripower™. Houve correlação positiva e significativa entre a produção da biomassa e o acúmulo de Si na parte aérea da planta. A dose 375 kg ha<sup>-1</sup> aumentou em 34 % a biomassa da cana-de-açúcar. Os teores de Si no solo e na planta aumentaram proporcionalmente com as quantidades adicionadas pelo fertilizante. A disponibilidade de P, K, Mn e Cu mais a capacidade de troca catiônica cresceram nos solos tratados com diatomito. Houve correlação e efeito significativo da absorção do Si com a nutrição mineral da planta. O acúmulo de Si promoveu aumento nos teores de N, P, S, Mn e Zn na parte aérea da cana-de-açúcar. Portanto, a integração do uso da fertilização silicatada com diatomito no manejo de adubação da cana-de-açúcar pode aumentar significativamente a produtividade da cultura quando cultivada nos solos arenosos, tanto pelo efeito direto do acúmulo do Si na planta, como indiretamente pela maior disponibilidade dos nutrientes no solo.

**Palavras-chave:** Silicato amorfo. Nutrição mineral. Solos arenosos. Fertilidade do solo

## EFFECTS OF THE APPLICATION OF DIATOMITE IN THE SUGAR CANE CULTIVATED IN ARENOSOL

### ABSTRACT

The diatomite is a source of biogenic silicon, more concentrated and of greater solubility compared to other silicate sources, and its use can increase significantly the production and nutritional status of sugarcane grown in silicon-deficient sandy soils. In this sense, the present research had as objectives to evaluate the effects of amorphous silicate fertilizer, based on diatomite, on (i) the levels of Si in soil and plant; (ii) the physical-chemical properties of the soil; and (iii) biomass production and mineral nutrition of sugarcane. The experiment was carried out in a greenhouse using the sugarcane variety RB 06-1675 that was cultivated in a Arenosol. The experimental design was in randomized blocks with five doses of Si (75, 150, 225, 300 and 375 kg ha<sup>-1</sup>) plus control (without addition of Si), with four replications. The source was a diatomite based granular fertilizer marketed by Agripower™. There was a positive and significant correlation between the biomass production and the Si accumulation in the aerial part of the plant. The 375 kg ha<sup>-1</sup> dose significantly increased sugarcane biomass by 34%. The levels of Si in soil and in the plant increased proportionally with the amounts added by the fertilizer. The cationic retention capacity and availability of P, K, Mn and Cu increased in soils treated with diatomite. There was a correlation and significant effect of the Si absorption with the mineral nutrition of the plant. The accumulation of Si promoted an increase in N, P, S, Mn and Zn contents in the aerial part of sugarcane. Therefore, the integration of silicate fertilization with diatomite in the management of sugarcane fertilization can significantly increase crop productivity when grown in sandy soils, either by the direct effect of Si accumulation in the plant, or indirectly by the greater availability of nutrients in soil.

**Keywords:** Amorphous silica. Mineral nutrition. Sandy soils. Soil fertility.

#### 4.1. INTRODUÇÃO

O silício (Si) é um metalóide abundante na crosta terrestre e benéfico para plantas, amenizando os estresses causados pela deficiência hídrica (AMIN et al., 2018); salinidade (WANG et al., 2015); toxidez por  $Al^{3+}$  e metais (TRIPATHI et al., 2015); pragas; e doenças (CAMARGO; KORNDÖRFER; WYLER, 2014). Plantas supridas com Si, em especial espécies acumuladoras como a cana-de-açúcar, também podem apresentar melhor status nutricional, maior crescimento, produtividade e qualidade (KEEPING, 2017).

No solo, o teor médio total de Si é 54 % e encontram-se, predominantemente, na estrutura dos minerais silicatados e/ou na forma de compostos insolúveis (KABATA-PENDIAS, 2011). Naturalmente, os teores de Si disponível para as plantas são muito baixos devido à liberação lenta de Si pelo intemperismo dos minerais e à baixa contribuição proveniente da decomposição dos resíduos orgânicos. As perdas promovidas pela exportação de Si na biomassa das culturas e pelo processo de dessilicação no solo acentuam a depleção do Si prontamente disponível (LIANG et al., 2015).

Em solos deficientes em silício ( $< 10,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ), trabalhos têm demonstrado que a fertilização silicatada corretiva promove aumento significativo sobre os parâmetros biométricos (nº perfilhos, altura e diâmetro do colmo), industriais (fibra e açúcar total redutor) e de produtividade da cana-de-açúcar (CAMARGO; ROCHA; KORNDÖRFER, 2013; HAYNES, 2014). A produtividade média nacional da cana-de-açúcar é de  $72 \text{ t ha}^{-1}$ , entretanto, em solos arenosos foi verificada produtividade significativamente menor ( $< 50 \text{ t ha}^{-1}$ ) (CONAB, 2019). Solos arenosos são caracterizados pela baixa capacidade de retenção de cátions e água, baixa fertilidade natural e teor de matéria orgânica, e teores de Si solúvel no solo muito baixos, fatores que, provavelmente, explicam os teores mais baixos de Si solúvel em solos de textura franco-arenosa e arenosa avaliados por Crusciol et al. (2018). No manejo de solos deficientes em Si, existem muitas fontes que são utilizadas na agricultura variando amplamente quanto aos teores totais e a solubilidade do Si. A maioria das pesquisas, especificamente no Brasil, comumente utilizam fertilizantes baseados em silicato de cálcio ou wollastonita ( $CaSiO_3$ ) e as escórias siderúrgicas (ALVAREZ et al., 2018; CAMARGO et al., 2013; DEUS; BÜLL, 2013). Silicatos de Ca são fontes de baixa solubilidade, enquanto que as escórias podem ter elevados teores de metais em sua composição, decorrente do processo de fabricação das ligas de aço e ferro (LIANG et al., 2015). Esses fatores podem aumentar a relação custo/benefício seja pela necessidade de adicionar maiores quantidades de fertilizantes silicatados no solo a fim de obter

maior acúmulo de Si na planta, seja pelo risco de poluição do solo e exposição humana a metais, por meio do contato direto com o solo e do consumo de alimentos enriquecidos em metais.

Como possível solução a estes problemas, pode-se utilizar fertilizantes silicatados derivados de fontes amorfas, tal como o diatomito, que são mais solúveis e contém teores traços de metais. O diatomito é uma rocha sedimentar de origem biogênica, constituída do acúmulo de carapaças de fósseis de algas diatomáceas e composta, predominantemente, por sílica amorfa ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) (SANDHYA; PRAKASH, 2019). Além de apresentar maior solubilidade em relação às fontes comumente utilizadas, fertilizantes de sílica amorfa podem contribuir para a retenção de água e cátions no solo (PATI et al., 2016). Contudo, pesquisas utilizando essa fonte na agricultura são pouco documentadas, sendo necessário ainda elucidar os efeitos da supracitada fonte na disponibilidade de Si, bem como possíveis alterações nos solos e nas plantas.

Neste sentido, o presente estudo teve por objetivo avaliar o potencial da aplicação de um fertilizante silicatado amorfo, derivado de diatomito, sobre a disponibilidade de Si no solo, na produção de biomassa e no acúmulo de Si na cana-de-açúcar cultivada em um Neossolo Quartzarênico. Adicionalmente, foram avaliados os efeitos da fertilização silicatada nas propriedades químicas e físico-química do solo, assim como o status nutricional da planta.

## **4.2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.2.1. Montagem do experimento**

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no período de janeiro a abril de 2018 e conduzido no delineamento experimental de blocos casualizados. Os tratamentos consistiram de cinco doses de silício (75, 150, 225, 300, 375 kg ha<sup>-1</sup>) mais o controle (sem adição de Si), com quatro repetições. A fonte utilizada foi um fertilizante granulado (2 – 5 mm) produzido a partir de diatomito (Agridpower™). O fertilizante contém 29,0; 1,4; 1,1 % de Si, Ca e Mg total, respectivamente; capacidade de troca de cátions > 50,0 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; e teores traços de metais pesados (a exemplo de Cd, Pb, Cr, Cu e Zn). Os tratamentos foram aplicados no solo classificado como Neossolo Quartzarênico, que, foi acondicionado em vasos de 10 dm<sup>-3</sup> e cultivados com cana-de-açúcar.

O solo utilizado no experimento foi coletado na camada de 0,0 – 0,2 m de profundidade em uma área representativa de cultivo da cana-de-açúcar, no município de Santa

Rita-PB, Nordeste brasileiro (6°56' 43,4"S e 35°07' 57,7"W). O solo foi seco; peneirado em malha de 4 mm; e três subamostras foram analisadas química e fisicamente como descrito pela EMBRAPA (2011) (Tabela 1). O solo foi adubado com macro e micronutrientes, nas seguintes doses e fontes: 50 mg dm<sup>-3</sup> de N (Ureia), 150 mg dm<sup>-3</sup> de K (KCl), 400 mg dm<sup>-3</sup> de P (MAP), 40 mg dm<sup>-3</sup> de S (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), 3,664 mg dm<sup>-3</sup> de Mn (MnCl<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O), 4 mg dm<sup>-3</sup> de Zn (ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O), 1,329 mg dm<sup>-3</sup> de Cu (CuSO<sub>4</sub>), 1,556 mg dm<sup>-3</sup> de Fe (FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O) e 0,15 mg dm<sup>-3</sup> de Mo (Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O). Duas mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar, variedade RB 06-1675, foram transplantadas para cada vaso e o solo foi mantido a 80% da capacidade máxima de retenção de água.

**Tabela 1.** Características químicas e físicas do solo utilizado no experimento

pH	água (1:2.5)	7.6
Ca <sup>2+</sup>	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	10.0
Mg <sup>2+</sup>	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	7.0
K <sup>+</sup>	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0.5
Na <sup>+</sup>	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0.0
Al <sup>3+</sup>	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0.0
H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	7.0
SB	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	17.0
CTC	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	7.4
P	mg dm <sup>-3</sup>	12.2
COS	g kg <sup>-1</sup>	2.7
MOS	g kg <sup>-1</sup>	4.7
Si <sub>a</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	7.2
Si <sub>c</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	3.7
Areia	g kg <sup>-1</sup>	965.5
Silte	g kg <sup>-1</sup>	10.5
ARgila	g kg <sup>-1</sup>	24.0
D <sub>s</sub>	g cm <sup>-3</sup>	1.5

*BS* soma de bases; *CTC* capacidade de troca catiónica; *COS* carbono orgânico do solo; *MOS* matéria orgânica do solo; *Si<sub>a</sub>* Si disponível extraído com ácido acético 0.5 mol L<sup>-1</sup>; *Si<sub>c</sub>* Si disponível extraído com CaCl<sub>2</sub> 0.01 mol L<sup>-1</sup>; *D<sub>s</sub>* densidade do solo

#### 4.2.2. Análises químicas da planta e do solo

A parte aérea das plantas foram coletadas aos 70 dias após o transplante. As plantas foram lavadas com água destilada; secas em estufa a 65°C até peso constante; pesadas; e trituradas em moinho de facas, tipo Willey. O teor de Si, na matéria seca da parte aérea da cana-de-açúcar, foi determinado de acordo com a metodologia adaptada por Korndörfer et al. (2004). Ainda com relação à planta, também foram analisados os teores de N, Ca, Mg, K, P, Cu, Fe, Mn e Zn. O N foi extraído pela digestão de 0,2 g do material vegetal em ácido sulfúrico concentrado a 350°C, de acordo com o método de Kjeldahl (TEDESCO et al., 2005); enquanto

que os demais elementos foram determinados no extrato da digestão de 0,5 g das amostras em solução nitroperclórica a 200°C.

Amostras de solos foram coletadas no fim do experimento para análises químicas. Foram analisados o pH; Ca e Mg trocáveis extraídos por KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; a disponibilidade de Cu, Fe, Mn, Zn, K e P extraídos por Mehlich-1; e a capacidade de troca de cátions (CTC) pelo método do acetato de sódio/amônio (RICHARDS, 1954). Os teores de Si solúvel no solo foram avaliados por duas soluções extratoras: CaCl<sub>2</sub> (0,01 mol L<sup>-1</sup>) e ácido acético (0,5 mol L<sup>-1</sup>) (KORNDORFER, PEREIRA; NOLLA, 2004).

As determinações de P foram realizadas por colorimetria; K por espectrometria de chama; Ca e Mg no solo por complexometria; enquanto que Ca e Mg na planta, juntamente com Cu, Fe, Mn e Zn (no solo e na planta) por espectrometria de absorção atômica (AAS Perkin Elmer 800S). O Si no solo e na planta foram determinados em espectrômetro UV por meio da formação do complexo silício-molibdato. Todas as análises, exceto N, Si e CTC, foram realizadas de acordo com os protocolos preconizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2013).

Como controle de qualidade foram utilizadas juntamente com as amostras analisadas, provas em branco e do material de referência SRM 1570a (*Spinach Leaves*), que possui os teores dos elementos certificados pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST). Todas as análises foram realizadas em duplicata e as recuperações dos elementos no material referência variaram de 93 – 107%.

A absorção de silício pela cana-de-açúcar a partir do silicato amorfo (SiFS) foi calculada usando a equação 1:

$$SiFS_{(mg\ kg^{-1})} = Si_{abs/Si} - Si_{abs/control} \quad (1)$$

Onde  $Si_{abs/Si}$  é o teor de Si (mg kg<sup>-1</sup>) absorvido pela parte aérea da cana-de-açúcar que recebeu os tratamentos com Si e o  $Si_{abs/control}$  é o teor de Si (mg kg<sup>-1</sup>) absorvido pela parte aérea da cana-de-açúcar no controle (SOUZA; KORNDÖRFER, 2010; CAMARGO et al., 2013). O Índice de Recuperação de Si (IR) também foi calculado para os solos que receberam aplicações de Si, pela equação 2:

$$IR_{(\%)} = \left( \frac{SiFS}{Si_{ap}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Onde  $Si_{ap}$  são as quantidades de Si adicionadas por vaso (375, 750, 1125, 1500 e 1875 mg vaso<sup>-1</sup> equivalentes as doses de 75, 150, 225, 300 e 375 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente) no presente estudo.

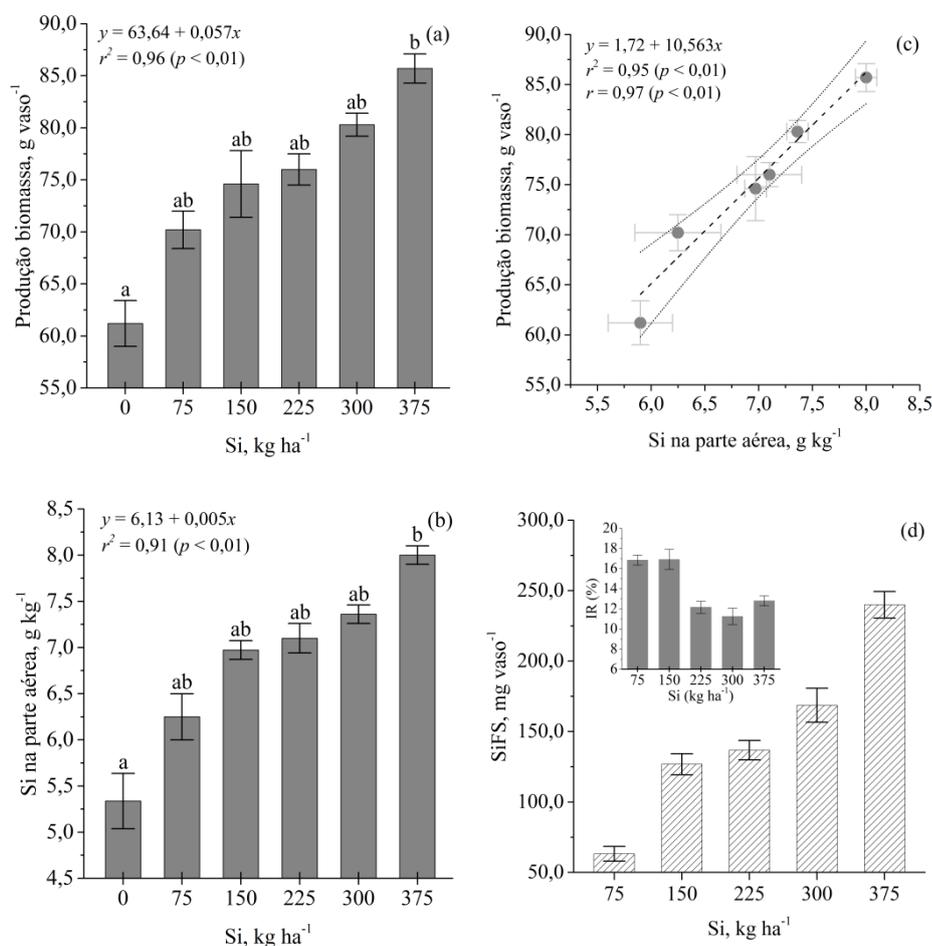
#### 4.2.3. Análises estatísticas

Os valores da média e do desvio-padrão foram calculados para todas as variáveis analisadas. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA *one-way*) com  $p < 0,05$ . Para analisar os efeitos das doses de aplicação de Si, modelos de regressões foram ajustados aos resultados da produção de biomassa e dos teores de Si na parte aérea da cana-de-açúcar e no solo. Os valores do coeficiente de regressão ( $r^2$ ) e o nível de significância (5 ou 1% de probabilidade) foram utilizados como critérios de melhor ajuste. Análise de correlação linear de Pearson ( $p < 0,05$ ) foi realizada entre as variáveis: produção de biomassa e o teor de Si na parte aérea; teores de Si na parte aérea e no solo; teores dos nutrientes e Si na parte aérea. Os valores médios, dos parâmetros da fertilidade do solo, dos elementos essenciais e Si na planta, foram comparados estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos. Todo procedimento estatístico foi realizado utilizando o software STATISTICA (versão 10.0).

### 4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.3.1. Produção de biomassa e absorção de Si pela cana-de-açúcar

A biomassa e o teor de Si da parte aérea da cana-de-açúcar cresceram linearmente com o aumento das doses do diatomito aplicado ao solo. A produção da biomassa e do teor de Si na planta teve aumento significativo de 34 e 30% na dose de 375 kg ha<sup>-1</sup> Si em relação ao controle, respectivamente (Figuras 1a, b). Trabalhos têm confirmado que a adubação silicatada aumenta a produção de biomassa da cana-de-açúcar e respostas significativas sobre a biomassa, comumente, têm sido verificadas em doses  $> 5$  t ha<sup>-1</sup> (SOUZA; KORNDÖRFER, 2010; BOKHTIAR et al. 2012; CAMARGO et al., 2017; MACCRAY; JI, 2018), quantidade 285% superior a do diatomito (1,3 t ha<sup>-1</sup>) utilizado na maior dose-resposta no presente estudo.



**Figure 1.** Produção de biomassa (a); do teor de silício (b); relação entre a biomassa e o teor de Si (c); absorção de Si pela cana-de-açúcar a partir da fertilização silicatada (SiFS) e índice de recuperação de silício (IR); da parte aérea das plantas de cana-de-açúcar submetidas a doses de Si na forma de diatomito. *p*-valor significância pela ANOVA. Valores seguidos pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ )

A maior eficiência do diatomito pode estar associada ao fato do mesmo ser uma fonte concentrada em Si (29 % de Si total) e de maior solubilidade (75,4 g kg<sup>-1</sup> 0,5 N HCl) em relação a outras fontes silicatadas, tais como, as escórias siderúrgicas que são as fontes silicatadas mais utilizadas na agricultura e que possuem teores totais de Si variando entre 5 - 19 % (DEUS; BULL 2013; GUO et al., 2018; HAYNES et al., 2013); a wollastonita e os silicatos de Ca com teores médios totais de Si de 18 e 15 %, respectivamente (AGOSTINHO et al., 2017; CAMARGO et al., 2014; CAMARGO et al., 2017; CHAGAS et al., 2016). Com relação ao Si solúvel, HAYNES et al. (2013), avaliando a solubilidade de Si em diferentes fontes silicatadas,

observaram que as escórias tiveram teores de Si solúvel em 0,5 N HCl entre 38,3 – 66,2 g kg<sup>-1</sup>, enquanto que o silicato de Ca teve teor médio de 1,8 g kg<sup>-1</sup>.

A produção da biomassa da parte aérea da cana-de-açúcar correlacionou-se positivamente e significativamente com a absorção de Si (Figura 1c). O silício é considerado um elemento benéfico e seu acúmulo pode promover alterações ultraestruturais, bioquímicas e fisiológicas na planta, tais como: (i) aumento do crescimento radicular por meio da extensibilidade da parede celular nas regiões de crescimento da raiz, que resultará em uma maior aquisição de água e nutrientes (HATTORI et al., 2003; KIM et al., 2014; WANG et al. 2015); (ii) maior eficiência do uso da água, devido a maior condutância estomática, conteúdo da água na folha, condutância hidráulica da raiz para toda a planta e a redução da taxa transpiratória (WANG et al. 2015).

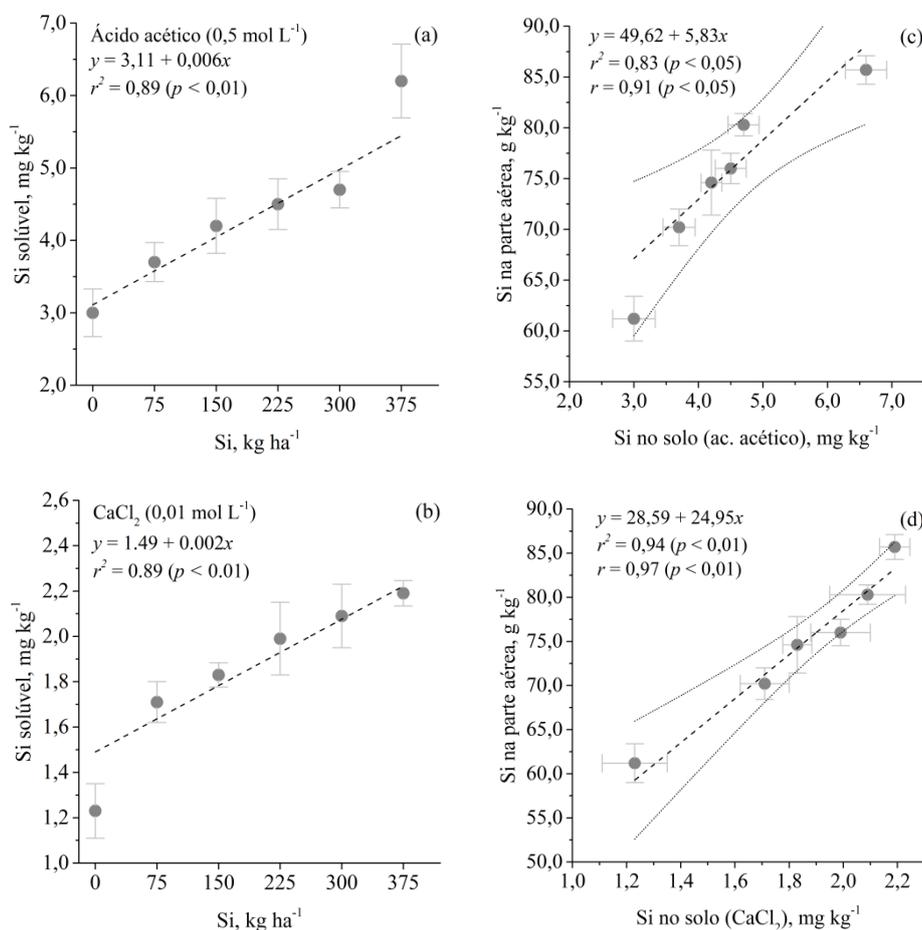
Trabalhos têm demonstrado que o maior potencial hídrico em plantas tratadas com Si pode estar relacionado com o aumento da expressão de genes de proteínas intrínsecas da membrana plasmática, as aquaporinas, que proporcionam aumento na permeabilidade da membrana e, conseqüentemente, a absorção de água pela célula (LIU et al., 2015; ZHU et al., 2015); como também pela formação da camada de sílica (SiO<sub>2</sub>) na epiderme das folhas, reduzindo desta forma a transpiração foliar (AHMED et al., 2014); (iii) o aumento da biossíntese dos pigmentos fotossintéticos (clorofilas a/b e carotenoides) e das trocas gasosas (maior concentração de CO<sub>2</sub> intercelular) nas folhas, resultando em uma maior taxa fotossintética e maior produção de fotoassimilados (XIE et al., 2015; IMTIAZ et al., 2016); (iv) aumento na absorção de macro e micronutrientes na planta (BITYUTSKII et al., 2014; CHEN et al., 2016; SINGH et al., 2006); que somadas proporcionarão maior crescimento, produtividade e qualidade vegetal.

A remoção de Si pela cana-de-açúcar aumentou proporcionalmente às quantidades adicionadas ao solo. As plantas tratadas com diatomito removeram 19, 39, 42, 52 e 74% de Si do solo a mais do que o controle (nas doses 75, 150, 225, 300 e 375 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente). O índice de recuperação (IR) do Si aplicado ao solo reduziu em média 29% nas doses ≥ 225 kg ha<sup>-1</sup> em relação aos tratamentos 75 e 150 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 1d). A redução do IR pode ser justificada pelo fato de que parte do ânion-silicato livre (H<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub><sup>-</sup>) na solução do solo pode ser (i) adsorvido especificamente aos sítios de ligação dos óxidos de Fe e Al do solo (KABATA-PENDIAS, 2011); (ii) formar complexos estáveis com os íons fosfato, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> e outros metais (a exemplo do Fe<sup>3+</sup>, Zn<sup>2+</sup> e Cu<sup>2+</sup>) (ADREES et al., 2015); (iii) precipitar nas formas de

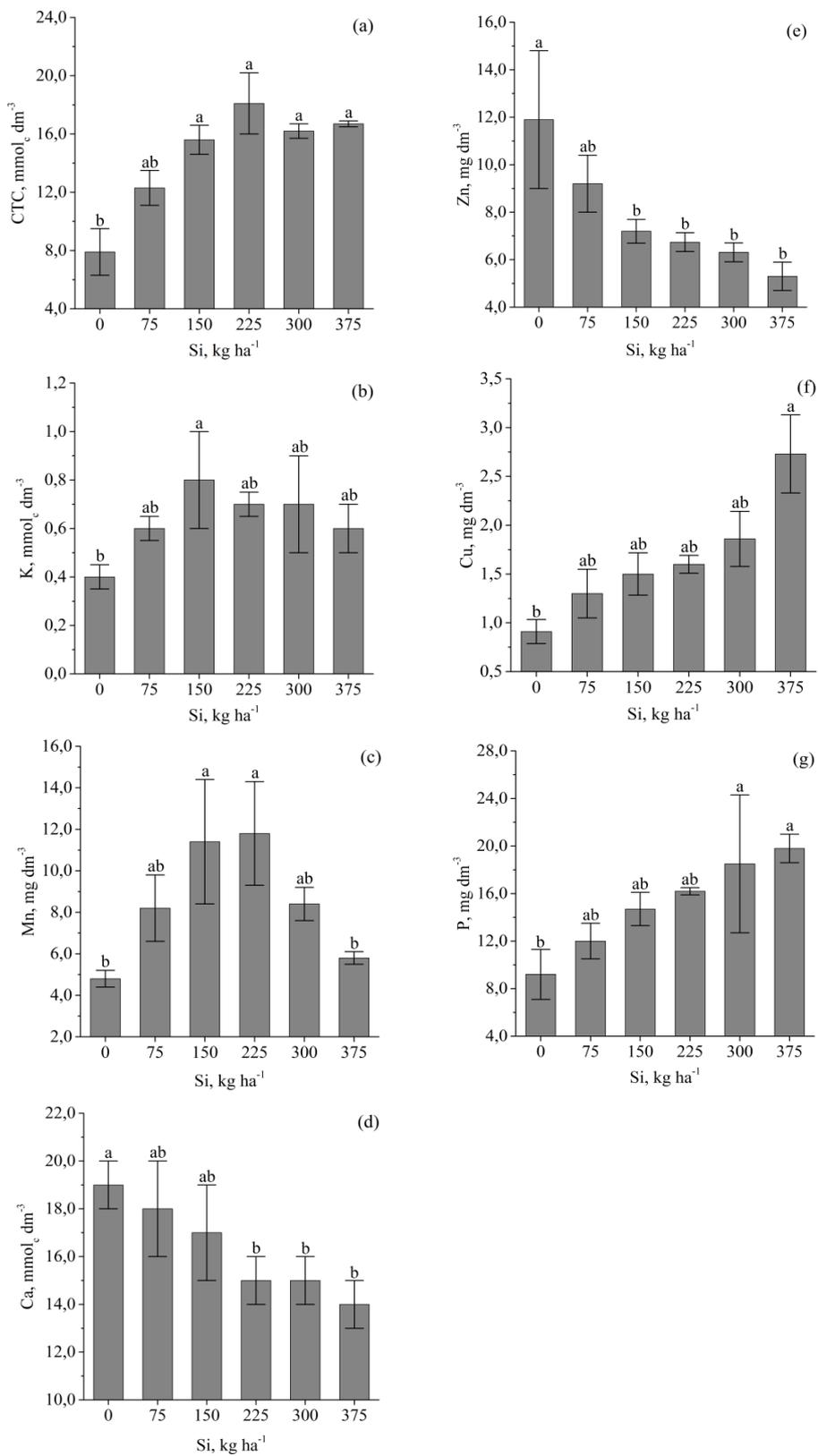
hidróxido e óxido de baixa solubilidade; e (iv) se polimerizar para a forma de ácido polissilícico [ $n(\text{Si}(\text{OH})_4)$ ,  $n \geq 2$ ] (LIANG et al., 2015); todos os processos podem contribuir para a redução da disponibilidade de Si no solo.

#### 4.3.2. Si solúvel e alterações nas propriedades químicas e físicas no solo.

Os teores de silício solúvel no solo aumentaram significativamente em função das doses de diatomito aplicadas aos solos. A dose de  $375 \text{ kg ha}^{-1}$  promoveu aumento médio de 95% em relação ao controle (Figura 2a, b). Este resultado confirma que o material foi reativo no solo e por ser uma fonte relativamente mais solúvel proporcionou aumento significativo do Si prontamente disponível para as plantas.



**Figure 2.** Teores médios ( $\pm$ desvio padrão) de silício solúvel extraído com ácido acético ( $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ) e  $\text{CaCl}_2$  ( $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ) nos solos que foram submetidos a doses de diatomito (a – b). Relação entre os teores de Si na parte aérea da cana-de-açúcar e solúvel nos solos (c – d).  $p$ -valor significância pela ANOVA,  $r$  valores dos coeficientes lineares de Pearson



**Figure 3.** Características química e físico-química dos solos cultivados com cana-de-açúcar e submetidos a doses de diatomito. Valores seguidos pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). CTC capacidade de troca catiônica

Os teores de Si no solo diferiram quanto à utilização do extrator. O ácido acético ( $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ) extraiu 139 % a mais do que o  $\text{CaCl}_2$  ( $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ). Trabalhos têm confirmado a maior capacidade de extração do Si solúvel do solo pelo ácido acético  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  em relação ao  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  (CAMARGO et al., 2013; CAMARGO et al., 2014). A extração do Si com a solução de ácido acético ocorre em valores de pH muito baixo ( $1,0 - 2,0$ ), podendo extrair formas não-disponíveis de silício no solo, como também solubilizar fontes silicatadas que foram recentemente aplicadas ao solo, por estas razões os resultados da disponibilidade de Si extraído com ácido acético podem ser superestimadas (CRUSCIOL et al., 2018).

Os teores de Si solúvel no solo correlacionaram-se significativamente e positivamente com os teores de Si na parte aérea da cana-de-açúcar (Figura 2c – d). O Si do solo extraído com  $\text{CaCl}_2$  ( $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ) apresentou melhor correlação com os teores de Si na planta (Figura 2 c, d). O extrator  $\text{CaCl}_2$  é um sal neutro utilizado numa baixa molaridade, que operacionalmente fornece uma medida do Si rapidamente disponível e presente na solução do solo (LIANG et al., 2015).

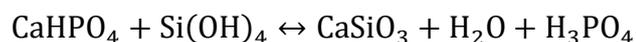
Não houve efeito significativo ( $p > 0,05$ ) para o pH e os teores disponíveis de Mg e Fe no solo, mas a adubação silicatada promoveu aumento significativo nos valores da CTC e dos teores disponíveis de K e Mn (Figuras 3a, b, c). A CTC teve aumento médio de 110% nas doses  $\geq 150 \text{ kg ha}^{-1}$  em relação ao controle. Enquanto que, os teores disponíveis de K e Mn aumentaram 100 e 138% em relação ao controle na dose  $150 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente.

O aumento da CTC pode ser justificado pelo fato do diatomito ser um material de alta porosidade (35 – 65%), alta permeabilidade, baixa densidade, com partículas de pequeno tamanho e de alta área de superfície específica, devido a estas características físicas, ele é capaz de reter umidade e íons catiônicos ( $\text{CTC} > 50 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) (PRAKASH et al., 2016). O aumento da CTC em solos de textura arenosa é algo de grande importância para o manejo da fertilidade do solo, pois minimiza as perdas por lixiviação do  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  e aumenta a disponibilidade destes nutrientes para a planta, como foi observado para o  $\text{K}^+$  no presente estudo.

Os teores disponíveis de Ca e Zn no solo reduziram com o aumento da adubação silicatada (Figuras 2d, e). O decréscimo destes nutrientes no solo pode ser explicado pela remoção realizada pela cana-de-açúcar; pela precipitação de compostos insolúveis com o ânion fosfato [ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  e  $\text{Zn}(\text{OH})\text{H}_2\text{PO}_4$ ] (NOVAIS et al., 2007); e com as formas dissociáveis do ácido silícico [ $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$ ,  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ ,  $\text{HSiO}_4^{3-}$  e  $\text{SiO}_4^{4-}$ ] presente na solução do solo (LIANG et al., 2015). Provavelmente, as reações de precipitação dos íons de Ca e Zn com os grupos fosfatos e

silicatos no solo foram mais evidentes por causa do valor do pH do solo próximo a neutralidade, que, geoquimicamente favorece a reação do  $\text{Ca}^{2+}$  e do  $\text{Zn}^{2+}$  com os grupamentos aniônicos (PEGANOVA, EDLER, 2004). Contudo, a redução destes nutrientes no solo não proporcionou dano ao crescimento da planta, nem tão pouco as plantas apresentaram sintomas de deficiência.

Fósforo e Cu no solo tiveram tendência similar. As disponibilidades destes elementos aumentaram com as adições do diatomito ao solo. A dose de  $375 \text{ kg ha}^{-1}$  aumentou significativamente 115 e 300% os teores de P e Cu em relação ao controle, respectivamente (Figuras 2f – g). O aumento dos teores do P pode ser justificado pela maior atividade do  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$  na solução do solo que promove a troca de ligantes com o íon  $\text{H}_3\text{PO}_4^-$  quimissorvido nos oxihidróxidos de Fe e Al do solo (ETESAMI et al., 2018); e pela solubilização da fase estável do fosfato ligado a Ca (DATNOFF et al., 2001), como mostrado na reação seguinte:

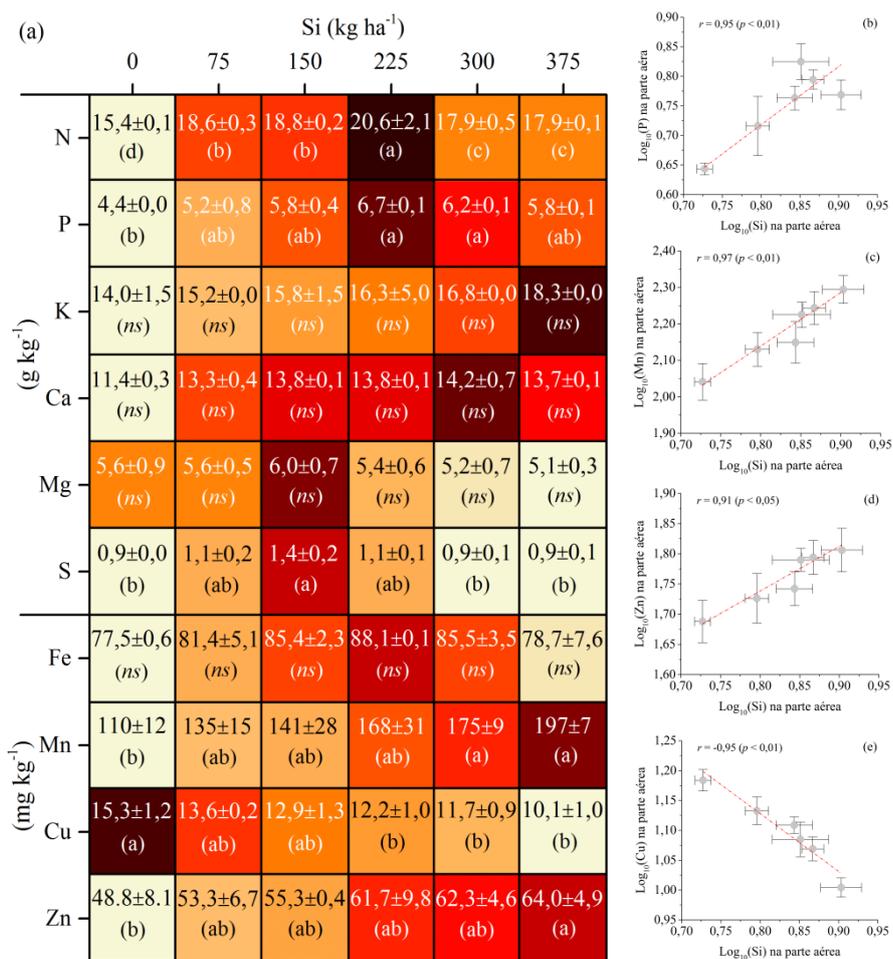


Com relação ao Cu, seu aumento pode ser possivelmente explicado pelo fato dos ânions fosfato e silicato terem sido sorvidos aos grupamentos orgânicos do solo, bloqueando assim os sítios de adsorção da matéria orgânica para o Cu e aumentando seu teor na fração trocável do solo.

#### 4.3.3. Avaliação nutricional

A adubação do solo com o diatomito induziu a uma maior absorção e translocação dos nutrientes para a parte aérea da cana-de-açúcar, exceto para o Mg e o Cu (Figura 3a). Não houve efeito significativo sobre os teores de K, Ca, Mg e Fe na planta em função da fertilização silicatada. Mas, os teores de N e P na parte aérea da cana-de-açúcar tratada com  $225 \text{ kg ha}^{-1}$  Si foram significativamente superior ao controle (34 e 52%, respectivamente). Assim como os maiores teores de S foram verificados nas doses  $75 - 225 \text{ kg ha}^{-1}$  Si e com a adição de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  o teor deste nutriente foi estatisticamente superior (56%) ao controle.

Os teores de Mn e Zn tiveram tendência similar, eles aumentaram linearmente em função da adição de Si. Plantas tratadas com  $375 \text{ kg ha}^{-1}$  de Si tiveram aumentos significativos de 31 e 79 % para Zn e Mn na parte aérea em relação ao controle, respectivamente. Por outro lado, os teores de Cu na planta apresentaram redução em seus teores com a adição de Si. Houve correlação positiva e significativa entre os teores de Si com os de P, Mn e Zn na parte aérea da cana-de-açúcar (Figura 3b – d), enquanto que para o Cu a correlação foi negativa (Figura 3e).



**Figure 4.** Heatmap dos teores médios ( $\pm$ desvio padrão) dos nutrientes na parte aérea da cana-de-açúcar submetida a doses de diatomito. Dentro de cada linha, cores mais escuras indicam maiores teores dos elementos (a). Correlação linear de Pearson entre os teores de Si e os nutrientes na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar submetidas a doses de diatomito (b – e). Valores seguidos pela mesma letra na mesma linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). *ns* não significativo. *r* valores dos coeficientes lineares de Pearson. *p*-valor significância pela ANOVA.

O Si pode desempenhar um papel importante sobre a absorção, transporte e distribuição dos nutrientes nas plantas (LIANG et al., 2015). Vários trabalhos têm confirmado que a fertilização silicatada aumenta significativamente as concentrações de macro e micronutrientes nas plantas (BITYUTSKII et al., 2014; CHEN et al., 2016; GONZALO et al., 2013; SINGH et al., 2006). O principal efeito benéfico do Si para a absorção de P na planta pode ser atribuído ao aumento da disponibilidade do P no solo, principalmente nas regiões tropicais com solos evoluídos e de alta capacidade de adsorção de P (ENEJI et al., 2008). Adicionalmente, trabalhos têm demonstrado que o Si pode também melhorar o status nutricional do P na planta, por meio do aumento da fosforilação fotossintética (ETESAMI; JEONG, 2018); pela redução da

absorção desnecessária de Fe e Mn (MA, 2004) e pelo aumento da translocação de P na planta (DATNOFF; SNYDER; KORNDÖRFER, 2011).

Com relação ao N e corroborando os resultados obtidos no presente estudo, Mali (2008) verificou maior acúmulo de N nas folhas de *Vigna unguiculata* tratadas com Si ( $50 - 100 \mu\text{g g}^{-1}$  Si) em relação ao tratamento controle, e, Detmann et al. (2012) afirmaram que a fertilização silicatada aumentou a eficiência do uso do N em plantas de arroz, por meio da alteração do metabolismo de compostos nitrogenados e sua distribuição na planta. O aumento da absorção de N nas plantas tratadas com Si pode ser decorrente do maior acúmulo de P na planta. Os teores de P e N na parte aérea da cana-de-açúcar correlacionaram-se ( $r = 0,89$   $p < 0,05$ ). Na planta, o P tem participação essencial no metabolismo do N e ambos interagem de forma sinérgica (MACHADO, 2000). A absorção do  $\text{N-NO}_3^-$  é um processo ativo, que requer energia metabólica para o transporte contra um gradiente de potencial eletroquímico, necessitando, portanto, de substâncias redutoras e de ATP (ARAÚJO; MACHADO, 2006). Desta forma maior fornecimento de P para a planta pode resultar numa maior taxa de absorção de nitrato e translocação para a parte aérea da planta (tendo em vista que o P pode ter efeito regulatório e específico na formação ou atividade do sistema transportador de  $\text{NO}_3^-$  nas membranas celulares) (RUFTY et al., 1993).

Informações sobre a possível relação Si – S na planta são escassas na literatura. Contudo, Lu et al. (2018) verificaram correlação positiva entre esses dois elementos na parte aérea de arroz cultivado em solo fertilizado com Si e enxofre. É razoável assumir que a maior absorção de S nas plantas tratadas com Si possa ser decorrente da maior atividade do  $\text{S-SO}_4^{2-}$  na solução do solo, como resultado da competição do íon silicato pelos sítios de ligação dos óxidos hidratados de Fe e Al.

O papel do Si, sobre o maior acúmulo de Zn e Mn na parte aérea, pode estar relacionado ao aumento da concentração de citrato, que, tornaria a redistribuição destes elementos mais eficaz na planta (HERNANDEZ-APAOLAZA, 2014). A relação inversa entre o Cu e o Si pode ser justificada pelo processo de imobilização ocorrido no sistema radicular, inibindo assim sua translocação para a parte aérea, tendo em vista, que sua disponibilidade no solo aumentou com a fertilização silicatada. Na raiz, o  $\text{Cu}^{2+}$  pode ter se ligado aos depósitos de Si formados na parede celular (FRANTZ et al., 2011), e, sua maior especificidade por estes sítios de adsorção pode estar relacionada ao fato dele ser mais eletropositivo do que o  $\text{Zn}^{2+}$  e por estar presente na forma de íon e/ou complexo minerais [ $\text{Cu(OH)}^+$ ;  $\text{CuCl}^+$ ] na solução do solo, diferentemente do

Mn-MnO<sub>2</sub>. Embora, os teores de Cu na planta tenham sido reduzidos com a fertilização silicatada, os valores observados em todos os tratamentos estiveram dentro da faixa ideal (8,0 a 10,0 mg kg<sup>-1</sup>) para a cultura da cana-de-açúcar (MALAVOLTA, 2006).

#### 4.4. CONCLUSÃO

A cultura da cana-de-açúcar respondeu de forma positiva e significativamente a adubação silicatada com diatomito no solo arenoso. O fertilizante foi eficiente em disponibilizar Si no solo e concentrá-lo na planta. O acúmulo de Si proporcionou maior crescimento e balanço nutricional na parte aérea da cana-de-açúcar. A adição de diatomito alterou a fertilidade do solo, aumentando significativamente a disponibilidade de P, K, Mn, Cu e a capacidade de retenção catiônica.

Desta forma, a integração da fertilização silicatada com diatomito no manejo de adubação da cana-de-açúcar proporciona incrementos significativos na produtividade da cultura quando cultivada em solos arenosos. Tanto pelo efeito direto do acúmulo do Si na planta, como indiretamente pela maior disponibilidade dos nutrientes no solo. Contudo, estudos de campo ainda são necessários para calibrar a dose de máxima eficiência agrônômica, a relação custo/benefício do insumo e a resposta da cultura sob condição real de cultivo.

#### REFERÊNCIAS

- ADREES, M.; ALI, S.; RIZWAN, M.; ZIA-UR-REHMAN, M.; IBRAHIM, M.; ABBAS, FARID, M.; QAYYUM, M. F.; IRSHAD, M. K. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, New York, v. 119, p. 186-197, 2015.
- AHMED, M.; ASIF, M.; HASSAN, F. Augmenting drought tolerance in sorghum by silicon nutrition. **Acta Physiologiae Plantarum**, Poland, v. 36, n. 2, p. 473-483, 2014.
- AGOSTINHO, F. B.; TUBANA, B. S.; MARTINS, M. S.; DATNOFF, L. E. Effect of different silicon sources on yield and silicon uptake of rice grown under varying phosphorus rates. **Plants**, Switzerland, v. 6, n. 3, p. 35, 2017.
- AMIN, M.; AHMAD, R.; ALI, A.; HUSSAIN, I.; MAHMOOD, R.; ASLAM, M.; LEE, D. J. Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. **Silicon**, Netherlands, v. 10, n. 2, p. 177-183, 2018.
- ARAÚJO, A. P.; MACHADO, C. T. T. Fósforo. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 253-281.

BITYUTSKII, N.; PAVLOVIC, J.; YAKKONEN, K.; MAKSIMOVIĆ, V.; NIKOLIC, M. Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of metal-mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. **Plant Physiology and Biochemistry**, Netherlands, v. 74, p. 205-211, 2014

BOKHTIAR, S. M.; HUANG, H. R.; LI, Y. R. Response of sugarcane to calcium silicate on yield, gas exchange characteristics, leaf nutrient concentrations, and soil properties in two different soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 43, n. 10, p. 1363-1381, 2012.

CAMARGO, M. S. de; 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**, Weinheim, v. 17, n. 1, p. 99-111, 2017.

CAMARGO, M. S. de; KORNDÖRFER, G. H.; WYLER, P. Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. **Field Crops Research**, Netherlands, v. 167, p. 64-75, 2014.

CAMARGO, M.S. de; ROCHA, G.; KORNDÖRFER, G.H. Silicate fertilization of tropical soils: silicon availability and recovery index of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.5, p.1267-1275, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000500016> .

CHAGAS, R.C.S.; MURAOKA, T.; KORNDÖRFER, G.H.; CAMARGO, M.S.de. Silicon fertilization improve yield and quality of rice and pearl millet in cerrado soils. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.32, n.4, p.899-907, 2016.

CHEN, D.; CAO, B., WANG, S.; LIU, P., DENG, X.; YIN, L.; ZHANG, S. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific Reports**, London, v. 6, p. 22882, 2016.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Brasília: Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 28 ene. 2019.

CRUSCIOL C. A. C.; ARRUDA D. P.; FERNANDES A. M.; ANTONANGELO J. A.; LUÍS REYNALDO F. A.; NASCIMENTO C. A. C.; OTÁVIO R. B.; MCCRAY J. M. Methods and extractants to evaluate silicon availability for sugarcane. **Scientific Reports**, London, v. 8, n. 1, p. 916, 2018.

DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. 424p. ISSN: 0928-3420

DETMANN, K. C.; ARAÚJO, W. L.; MARTINS, S. C.; SANGLARD, L. M.; REIS, J. V.; DETMANN, E.; RODRIGUES, A. N.; FERNI, A. R.; DAMATTA, F. M. Silicon nutrition increases grain yield, which, in turn, exerts a feed-forward stimulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. **New Phytologist**, Lancaster, v. 196, n. 3, p. 752-762, 2012.

DEUS, A. C. F.; BÜLL, L. T. Efficiency of steel slag in the common bean crop in the no-till system. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 10, p. 1783-1789, 2013.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: Embrapa. 3.ed. 2013. 353p.

ENEJI, A.E.; INANAGA, S.; MURANAKA, S.; HATTORI, T.; AN, P.; TSUJI, W. Growth and nutrient use in four grasses under drought stress as mediated by silicon fertilizers. **Journal of Plant Nutrition**, Weinheim, v.31, n.2, p.355-365, 2008.

ETESAMI, H.; JEONG, B. R. Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, New York, v. 147, p. 881-896, 2018.

FRANTZ, J. M.; KHANDEKAR, S.; LEISNER, S. Silicon differentially influences copper toxicity response in silicon-accumulator and non-accumulator species. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, United States, v. 136, n. 5, p. 329-338, 2011.

GONZALO, M. J.; LUCENA, J. J.; HERNÁNDEZ-APAOLAZA, L. Effect of silicon addition on soybean (*Glycine max*) and cucumber (*Cucumis sativus*) plants grown under iron deficiency. **Plant Physiology and Biochemistry**, Netherlands, v. 70, p. 455-461, 2013.

HATTORI, T.; INANAGA, S.; TANIMOTO, E.; LUX, A.; LUXOVÁ, M.; SUGIMOTO, Y. Silicon-induced changes in viscoelastic properties of sorghum root cell walls. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v. 44, n. 7, p. 743-749, 2003.

HAYNES, R.J. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v.177, n.6, p.831-844, 2014.

HERNANDEZ-APAOLAZA, Lourdes. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? A review. **Planta**, v. 240, n. 3, p. 447-458, 2014.

IMTIAZ, M.; RIZWAN, M. S.; MUSHTAQ, M. A.; ASHRAF, M.; SHAHZAD, S. M.; YOUSAF, B.; SAEED, D. A.; RIZWAN, M.; NAWAZ, M.A.; MEHMOOD, S. Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: a review. **Journal of environmental Management**, United States, v. 183, p. 521-529, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo agropecuário, 2017: IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 10 Jan. 2019.

KATABA-PENDIAS, A. Trace elements in soil and plants. 4 ed. Florida: CRC Press, 2011. 505 p.

KEEPING, M. G. Uptake of silicon by sugarcane from applied sources may not reflect plant-available soil silicon and total silicon content of sources. **Frontiers in Plant Science**, Switzerland, v. 8, p. 760, 2017.

- KIM, Y. H.; KHAN, A. L.; WAQAS, M.; SHIM, J. K.; KIM, D. H.; LEE, K. Y.; LEE, I. J. Silicon application to rice root zone influenced the phytohormonal and antioxidant responses under salinity stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, Weinheim, v. 33, n. 2, p. 137-149, 2014.
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. Análise de silício no solo, planta e fertilizante. Uberlândia: Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia GPSi-ICIAG-UFU, 2004. 50 p. Boletim técnico 02.
- LIANG, Y.; NIKOLIC, M.; BÉLANGER, R.; GONG, H.; SONG, A. **Silicon in agriculture: From theory to practice**. Berlin: Springer, 2015. 255p.
- LIU, P.; YIN, L.; WANG, S.; ZHANG, M.; DENG, X.; ZHANG, S.; TANAKA, K. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated salt-induced osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. **Environmental and Experimental Botany**, Netherland, v. 111, p. 42-51, 2015.
- McCRAY, J. M.; JI, S Calibration of sugarcane response to calcium silicate on Florida Histosols. **Journal of Plant Nutrition**, Weinheim, v. 35, n. 8, p. 1192-1209, 2012.
- MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.
- MALI, M.; AERY, N. Influence of silicon on growth, relative water contents and uptake of silicon, calcium and potassium in wheat grown in nutrient solution. **Journal of Plant Nutrition**, Weinheim, v.31, n.11, p.1867-1876, 2008.  
<https://doi.org/10.1080/01904160802402666>
- PATI, S.; PAL, B.; BADOLE, S.; HAZRA, G.C.; MANDAL, B. Effect of silicon fertilization on growth, yield, and nutrient uptake of rice. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.47, n.3, p.284-290, 2016.  
<http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2015.1122797>
- PEGANOVA, S.; EDLER, K. Zinc. **Elements and their compounds in the environment**, 2nd ed. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2004. p. 1203-1239.
- PRAKASH, N.B.; ANITHA, M.S.; SANDHYA, K. BEHAVIOUR of Different Levels and Grades of Diatomite as Silicon Source in Acidic and Alkaline Soils. **Silicon**, Netherlands, p.1-9, 2016.
- RICHARDS, L.A. **Diagnosis improvements of saline and alcalinesoils**. Washington, Departament of Agriculture, 1954. 160p.
- RUFTY JR, T. W.; ISRAEL, D. W.; VOLK, R. J.; QIU, J.; A, T. Phosphate regulation of nitrate assimilation in soybean. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 44, n. 5, p. 879-891, 1993.
- SINGH, A.K.; SINGH, R.; SINGH, K. Growth, yield and economics of rice (*Oryza sativa*) as influenced by level and time of silicon application. **Indian Journal of Agronomy**, New Delhi, v.50, n.3, p.190-193, 2005.

SOUZA, de RTX; KORNDÖRFER, G. H. Utilization of silicon from metallurgy slag by sugarcane. **Sugar Tech**, India, v. 12, n. 2, p. 98-103, 2010.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: UFRGS, 1997. 174 p.

TRIPATHI, D. K.; SINGH, V. P.; PRASAD, S. M.; CHAUHAN, D. K.; DUBEY, N. K.; RAI, A. K. Silicon-mediated alleviation of Cr (VI) toxicity in wheat seedlings as evidenced by chlorophyll florescence, laser induced breakdown spectroscopy and anatomical changes. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, New York, v. 113, p. 133-144, 2015.

WANG, S.; LIU, P., CHEN, D.; YIN, L.; LI, H.; DENG, X. Silicon enhanced salt tolerance by improving the root water uptake and decreasing the ion toxicity in cucumber. **Frontiers in Plant Science**, Switzerland, v. 6, p. 759, 2015.

XIE, Z.; SONG, R.; SHAO, H.; SONG, F.; XU, H.; LU, Y. Silicon improves maize photosynthesis in saline-alkaline soils. **The Scientific World Journal**, London, v. 2015, 2015.

ZHU, Y. X.; XU, X. B.; HU, Y. H.; HAN, W. H.; YIN, J. L.; LI, H. L.; GONG, H. J. Silicon improves salt tolerance by increasing root water uptake in *Cucumis sativus* L. **Plant Cell Reports**, Germany, v. 34, n. 9, p. 1629-1646, 2015.

## 5. SILICATO AMORFO NA NUTRIÇÃO, PRODUTIVIDADE E SEVERIDADE DE *Diatraea saccharalis* EM CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA EM UM SOLO ARENOSO

### RESUMO

O presente estudo teve por objetivo avaliar os efeitos da aplicação de um fertilizante granulado a base de sílica amorfa sobre o crescimento, a produtividade, as características tecnológicas e a absorção de Si e nutrientes, além da severidade causada pela broca do colmo *Diatraea saccharalis* na cana-de-açúcar. O experimento foi conduzido em campo, sob um Neossolo Quartzarênico cultivado com a variedade RB061675 da cana-de-açúcar. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, consistindo de cinco doses do fertilizante silicatado amorfo (125, 250, 500 e 750 kg ha<sup>-1</sup> Agrisilica) mais o controle (sem adição de Si), todos com quatro repetições. Os resultados mostraram que fertilização silicatada resultou em aumento significativo na altura, diâmetro do colmo e peso fresco das folhas verdes. Houve aumento significativo na absorção dos macro e dos micronutrientes em resposta ao acúmulo de Si na planta. A severidade da broca do colmo reduziu-se com o suplemento de Si e correlacionou-se negativamente com o acúmulo de Si no colmo da cana-de-açúcar. Os benefícios diretos e indiretos da nutrição da cana-de-açúcar com Si promoveu incrementos significativos sobre a produtividade e as características tecnológicas da cultura, desta forma a adubação silicatada em solos arenosos, deficientes em Si, pode ser uma prática economicamente viável capaz de proporcionar maiores rendimentos ao setor sucroalcooleiro.

**Palavras chave:** Elemento benéfico. Tolerância. Silício. Diatomito.

**AMORPHOUS SILICATE IN NUTRITION, PRODUCTIVITY AND SEVERITY OF *Diatraea saccharalis* IN SUGARCANE CULTIVATED IN A SANDY SOIL**

**ABSTRACT**

The objective of the present study was to evaluate the effects of the application of an amorphous silica based fertilizer on the growth, productivity, technological characteristics and absorption of Si and nutrients, as well as the severity caused by the stalk borer, *Diatraea saccharalis*, in the sugarcane plants. The experiment was conducted in the field, under a Arenosol cultivated with the variety RB 06-1675 of sugarcane. The experimental design was in randomized blocks, consisting of five doses of the amorphous silicate fertilizer (125, 250, 500 and 750 kg ha<sup>-1</sup> Agrisilica) and the control (without addition of Si), all with four replicates. The results showed that silicate fertilization resulted in a significant increase in height, diameter of the stem and fresh weight of green leaves. There was a significant increase in the uptake of macro and micronutrients in response to the accumulation of Si in the plant. The severity of the sugarcane stalk borer was reduced with the Si supplement and negatively correlated with the Si accumulation in the cane sugarcane stem. The direct and indirect benefits of sugarcane nutrition with Si promoted significant increases in productivity and crop technological characteristics, so silicate fertilization in sandy soils, Si-deficient, may be an economically viable practice capable of providing higher yields to the sugar and alcohol industry.

**Keywords:** Beneficial element. Tolerance. Silicon. Diatomite.

## 5.1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é um cultivo de importância econômica no Brasil, ocupando uma área de produção de 9 milhões de hectares, aproximadamente (CONAB, 2019). O incremento da área resultou na expansão para solos com menor fertilidade e que, portanto, requerem manejo adequado para a nutrição da planta. Por outro lado, O cultivo intensivo pode diminuir a disponibilidade de Si no solo, gerando as necessidades de fertilização (EPSTEIN, 2009). Neste sentido, a adubação com Si pode apresentar efeitos positivos importantes na produtividade da cana-de-açúcar em solos com baixos teores do elemento (MANECHINI; DONZELLI, 1984). A cana-de-açúcar é uma monocotiledônea acumuladora de Si, podendo absorvê-lo em níveis similares ou superiores aos macronutrientes (MANECHINI; DONZELLI, 1984, CAMARGO; KORNDÖRFER; WYLER, 2014, MEENA et al., 2014).

Apesar do alto conteúdo total de Si no solo, a maior parte do elemento encontra-se em forma não disponível ou insolúvel, não sendo prontamente absorvido pelas plantas (ZHU, GONG, 2014). Devido à existência de culturas acumuladoras de Si, a aplicação e a reposição de Si ao solo via fertilizantes silicatados é necessária, principalmente em solos com baixa disponibilidade deste elemento, como os solos arenosos. O tipo de fertilizante, a granulometria e o origem podem influenciar na resposta das culturas (PEREIRA et al., 2004; PEREIRA et al., 2010). No Brasil, o silicato de cálcio ou wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ) e as escórias silicatadas são as principais fontes de Si utilizadas na adubação.

As concentrações de Si nas plantas dependem das características de absorção e transporte do elemento, as quais apresentam alta variabilidade entre espécies (EPSTEIN, 1994; MA; YAMAJI, 2008). Na cana-de-açúcar, a concentração de Si pode variar de 0,14% em folhas jovens até 6,7% em colmos e folhas velhas. Dentro da planta, o Si é depositado nas paredes celulares, no lúmen e extracelularmente (LEITE et al., 2008).

O Si pode trazer vantagens ao crescimento e desenvolvimento das plantas, embora não seja considerado um nutriente (DATNOFF; SNYDER.; KORNDÖRFER, 2001; REYNOLDS; KEEPING; KEEPING; MEYER, 2013; LIANG et al., 2015). Dentre os benefícios, encontram-se o incremento da taxa fotossintética, a tolerância aos estresses hídrico e salino (ASHRAF et al., 2010; CAMARGO et al., 2010), a indução do aumento da tolerância a metais pesados (EPSTEIN, 2009; NASCIMENTO; CUNHA; RODRIGUES, 2009), a melhoria da disponibilidade e assimilação de nutrientes (MALI; AERY, 2008; MEENA et al., 2014) e a maior resistência a pragas e doenças (KORNDÖRFER, 1999; KEEPING et al., 2009; TRIPATHI et al., 2016, CROOKS; PRENTICE, 2016). Estes efeitos são ainda maiores quando

as plantas se encontram sometidas a algum tipo de estresse, seja biótico ou abiótico (DATNOFF et al., 2001; KORNDÖRFER; PEREIRA; CAMARGO, 2002).

A *Diatraea saccharalis* é uma das pragas que mais danam a planta da cana-de-açúcar. Os prejuízos diretos são causados pela abertura de galerias que ocasionam perda de peso da cana e que podem levar a planta à morte, especialmente em canas novas (GARCIA, 2013). O incremento da taxa de absorção de silicato pela cana-de-açúcar gera sua acumulação na planta e retarda a penetração do caule pelas larvas, gerando um incremento da mortalidade da larva pelo menor ganho do peso (KVEDARAS et al., 2005). O incremento da resistência mecânica também gera a resistência ao acamamento das plantas devido ao acúmulo do Si nas paredes celulares, o que incrementa a rigidez das paredes celulares (ANDRESS et al., 2015).

Efeitos positivos da adubação silicatada em cana de açúcar foram documentadas em vários países, como Estados Unidos, China, Austrália e Brasil, onde foram obtidos incrementos de até 50% no rendimento da cultura, em condições de campo (HAYNES, 2014). Os solos arenosos, devido a sua baixa disponibilidade de Si solúvel, são preferencialmente recomendados para ensaios e aplicações de Si em campo, por sua alta resposta (CAMARGO; ROCHA; KORNDÖRFER, 2013).

Neste contexto, o trabalho tem como objetivos avaliar os efeitos da aplicação de um fertilizante derivado de sílica amorfa sobre as características de crescimento, teores de Si e nutrientes nas plantas, incremento da produtividade e características tecnológicas da cana de açúcar. Devido a ocorrência de broca da cana na área de estudo, os efeitos das doses de Si sobre os danos dessa praga foram também avaliados.

## **5.2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.2.1. Local do estudo, amostragem e caracterização do solo.**

O experimento foi instalado na área da Usina Miriri Alimentos e Bioenergia S/A, localizado na zona rural do município de Santa Rita – PB (°56'43.3"S 35°07'58.1"W). A região, produtora de cana-de-açúcar, está inserida na mesorregião da Mata Sul do estado da Paraíba, sob solos de tabuleiros costeiros e baixada litorânea. O clima da região é classificado como tropical chuvoso (Aw) segundo a classificação de Köppen e Geiger. A temperatura média anual é 25.6 °C e a precipitação média anual de 1600 mm. (CLIMATE, 2017).

O solo da área foi classificado como Neossolo Quartzarênico segundo o sistema brasileiro de classificação de solos (SiBCS). As amostras de solo foram coletadas em duas profundidades 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m. Foram coletadas 15 amostras simples, misturadas e 500 g de solo aproximadamente foram tomadas para formar uma amostra composta representativa em cada profundidade. As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas numa peneira de 2 mm. Nas amostras foram determinadas as análises química e granulométrica conforme metodologia citada por EMBRAPA (2009) (Tabela 1).

Tabela1. Características químicas e física do solo da Usina Miriri (Santa Rita – PB)

<b>Tabela1.</b> Características químicas e física do solo da Usina Miriri (Santa Rita – PB).		
<b>Variáveis</b>	<b>0,0 – 0,2 m</b>	<b>0,2 – 0,4 m</b>
pH em água (1:2,5)	7,6	7,2
Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )	1,7	1,5
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )	1,0	0,4
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )	0,1	0,1
Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )	0,0	0,0
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )	0,0	0,0
H <sup>+</sup> +Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )	0,7	0,8
CTC (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )	2,5	2,4
P (mg dm <sup>3</sup> )	12,2	8,3
COS (g kg <sup>-1</sup> )	2,7	1,9
MOS (g kg <sup>-1</sup> )	4,7	3,3
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	24,0	24,5
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	10,5	12,5
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	965,5	963,5
Textura	Arenosa	Arenosa
Si - Ac. acético (mg L <sup>-1</sup> )	7,2	6,7
Si - CaCl <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	3,7	7,0

*COS* carbono orgânico do solo, *MOS* matéria orgânica do solo, *CTC* capacidade de troca catiônica.

O Si disponível do solo foi determinado segundo a metodologia adaptada por Korndörfer, Pereira e Nolla (2004). As amostras de solo foram secas e peneiradas em malha de 2 mm. Na extração foram usadas as soluções ácido acético 0,5 mol L<sup>-1</sup> e CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>. As amostras de solo foram agitadas, decantadas e filtradas. Posteriormente, a determinação foi feita em espectrofotômetro UV-visível, no comprimento de onda de 660 nm (Tabela 1).

### 5.2.2. Montagem e condução do experimento.

O solo da área teve acidez corrigida com a incorporação de 2,5t/ha. A adubação de plantio foi efetuada com 250 kg/ha de MAP no fundo do sulco, o potássio foi suprido por 1100

m<sup>3</sup> de vinhaça, aplicado em 5 eventos. A adubação de cobertura para nitrogênio foi efetuada com 100 kg de N aplicados de forma parcelada aos 60 e 90 dias depois do plantio. O silicato amorfo foi aplicado no sulco juntamente com a adubação de plantio nas doses de 0, 125, 250, 500 e 750 kg/ha, com quatro repetições; sendo um total de 20 parcelas. A caracterização química e física do silicato utilizado no ensaio encontra-se no Tabela 2.

**Tabela 2. Atributos físicos e químicos da Agrisílica**

<b>Atributo</b>	<b>Agrisílica</b>
Silício solúvel (sílice amorfa)	26%
Silício continuamente extraível	0,1%
Capacidade de troca catiônica	>30cmol/kg
Cálcio	1,4%
Magnésio	1,1%
Ferro	1,3%
pH	8-9
Tamanho de grânulo	2-5mm
Densidade	900kg/m <sup>3</sup>

Junto com a adubação de fundação e aplicação de Si, foram colocadas 12 gemas de cana-de-açúcar (cultivar B061675) por metro linear. As parcelas foram compostas por dez linhas de cana-de-açúcar com espaçamento duplo (0,8 e 1,6 m) com 10m de comprimento cada, com área de 102 m<sup>2</sup> para cada parcela. Apenas as seis linhas centrais foram consideradas para obtenção dos dados. As parcelas tiveram espaçamento de dois metros entre si; constituindo uma área total de 2784 m<sup>2</sup>.

### **5.2.3. Avaliações biométricas**

Foram selecionadas duas plantas por linha nas seis linhas representativas, formando um total de 12 plantas por parcela para análise biométrica de cada parcela. Foram medidas a altura do colmo (medida feita da superfície do solo até o colarinho da folha +1) e diâmetro do colmo. Adicionalmente foi selecionado um metro linear dentro das linhas representativas para a contagem do número de perfilhos. Posteriormente, estas plantas foram coletadas e separadas em folhas verdes, folhas secas e colmo, sendo realizada a pesagem dos colmos. As folhas, verdes e secas (palha), foram pesadas, lavadas e secas em estufa a 65 °C até alcançar peso constante. Posteriormente foi determinado o peso seco de ambas folhas.

#### **5.2.4. Avaliação do ataque da Broca (*Diatrea saccharalis*)**

Depois da pesagem, os colmos foram lavados e posteriormente realizou-se a contagem do número de entrenós. Os colmos foram cortados verticalmente para a identificação do ataque da broca. A incidência do ataque da broca foi determinada segundo a fórmula (LEITE et al., 2008):

$$I (\%) = (A/T) \times 100$$

Sendo I a incidência ou infestação, A o número de ataques e T número total de entrenós

#### **5.2.5. Análise tecnológica e produtividade**

Na colheita, a palha foi queimada, os colmos foram cortados e separados das folhas verdes. Foi realizado a pesagem dos colmos das seis linhas centrais (área útil) e extrapoladas para a determinação da produtividade (toneladas) de colmos por hectare (TCH). Para a análise tecnológica, foram selecionados dez colmos para a determinação da percentagem de fibra (%) e açúcar total recuperável-ATR (%). As análises tecnológicas foram realizadas no Laboratório Agroindustrial da Usina Miriri

#### **5.2.6. Análise química**

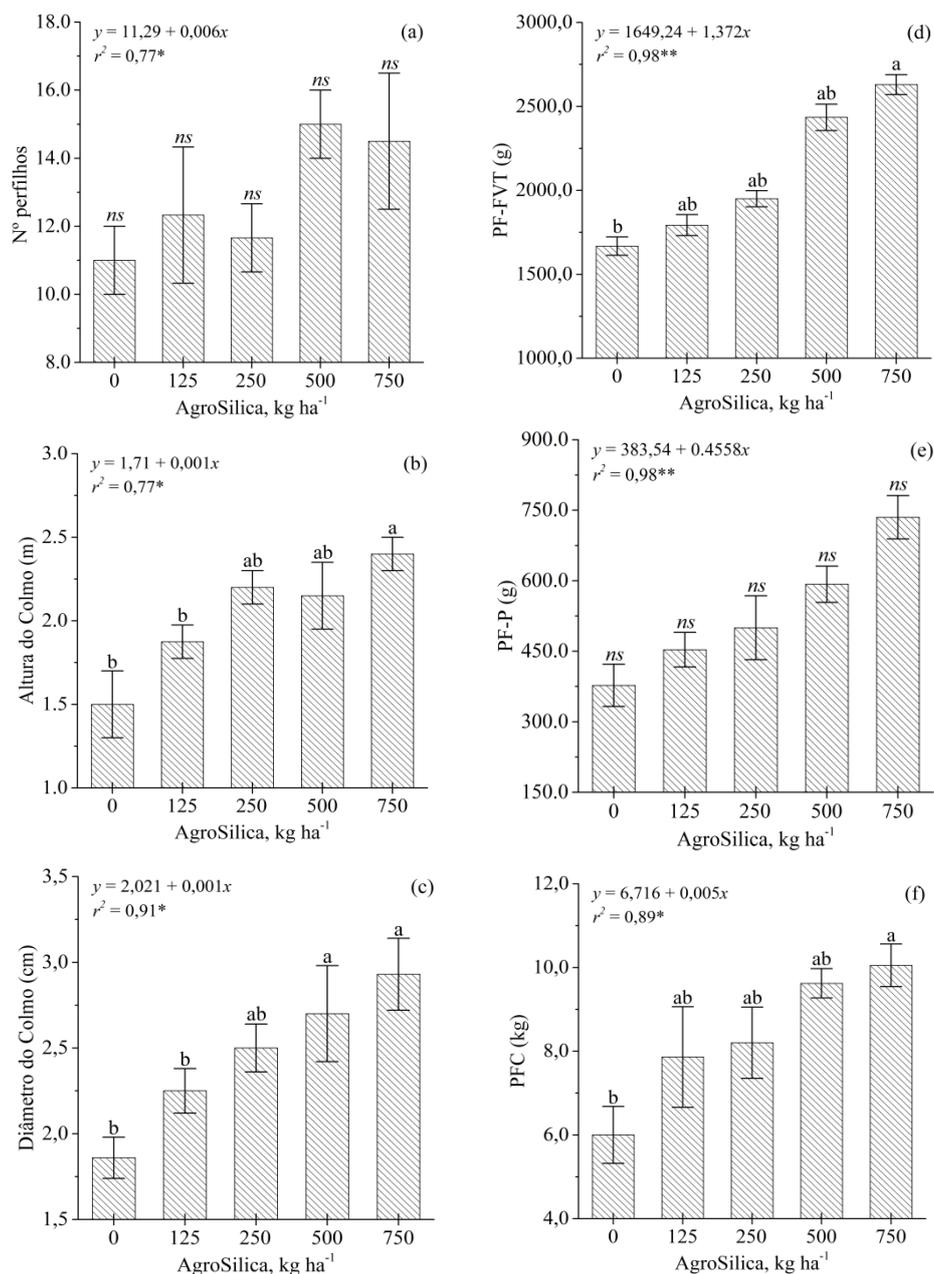
Antes da colheita, foram coletadas 2 folhas +3 em cada linha representativa, formando uma amostra composta de 12 folhas em total em cada parcela. As folhas foram lavadas e secas em estufa a 65 °C até alcançar peso constante. Posteriormente foram trituradas em moinho tipo Willye para sua determinação de Si, N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn. O Si acumulado na parte aérea foi determinado pelo método amarelo (KORNDÖRFE; PEREIRA; NOLLA, 2004).

O Si acumulado na parte aérea será determinado pelo método amarelo, adaptado por Korndöfer, Pereira e Nolla (2004). O N foi extraído por digestão sulfúrica e os demais nutrientes extraídos por digestão nitroperclórica. O N foi determinado por digestão-destilação (Kjendahl), o Si e P por colorimetria, o K por fotometria de chama, o Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn espectroscopia de emissão ótica com plasma acoplado (ICP-OES) (EMBRAPA, 2009).

### **5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **5.3.1. Efeito do Si na biometria da cana-de-açúcar**

Não houve efeito significativo das doses de Si aplicado nos valores médios do número de perfilhos e peso fresco da palha ( $p < 0,05$ ) (Figura 1a, e). Em condições de campo, os perfilhos podem ser afetados pelo cultivar, tipo de solo (MARQUES; SILVA, 2008) e pelo ataque de pragas como a *D. Saccharalis* (GARCIA, 2013).



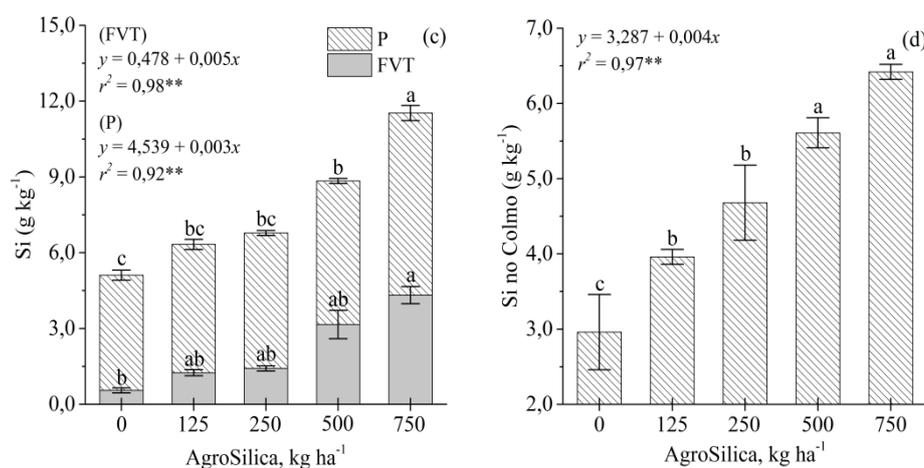
**Figura 1.** Valores médios ( $\pm$ desvio padrão) do número de perfilhos (a), altura e diâmetro do colmo (b – c), peso fresco das folhas verdes do topo (PF-FVT) (d), da palhada (PF-P) (e) e do colmo (PFC) (f) de plantas de cana-de-açúcar com 24 meses de idade; as avaliações foram realizadas nas plantas presentes em 1 m linear da parcela útil do experimento, que, adicionou doses de AgroSilica em um Neossolo Quartzarênico. ns não significativo. \* e \*\* significativo a 5 e 1% de probabilidade pela ANOVA. Valores médios seguidos pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Houve incrementos lineares e significativos para as variáveis altura do colmo, diâmetro do colmo, peso fresco das folhas verdes do topo (PF-FVT) e peso fresco do colmo (Figura 1b, c, d, f). Em relação à altura e diâmetro do colmo, os resultados obtidos com a maior dose (750 kg há<sup>-1</sup>) foram estatisticamente superiores aos obtidos pelo controle e a dose 125 kg ha<sup>-1</sup>, com incrementos de 44 e 37% respectivamente. A altura e o diâmetro têm um papel determinante na produtividade (MARQUES; SILVA, 2008). Estes resultados concordam com os resultados na figura 4c, onde a maior dose de aplicação obteve também a maior produtividade (TCH). Camargo et al. 2010, também comprovaram que os colmos com maior altura apresentaram maior produtividade.

Também houve efeito significativos para PF-FVT e o peso fresco do colmo (PFC) (Figura 1d e 1f), sendo a maior dose que mostrou os melhores resultados 62% e 56% respectivamente. No peso fresco da palha (PF-P) mesmo não ter apresentado efeito significativo entre as doses e o controle, os resultados foram sendo maiores com o incremento das doses. O Si está relacionado ao incremento da capacidade fotossintética da folha, proporcionando melhor arranjo, tornando-as mais eretas e mais resistentes a possíveis danos (AGARIE et al., 1998; MENEGALE; CASTRO; MANCUSO, 2015), portanto maior massa folhar.

### **5.3.2. Teores de Si nas folhas e colmo**

Houve incrementos significativos nos teores médios de Si nas folhas verdes do topo (FVT), na palha (folhas velhas secas) e no colmo (Figura 2). Nas FVT, os teores de Si foram 0,5 g kg<sup>-1</sup> no controle e 4,2 g kg<sup>-1</sup> na maior dose; na palha, esses valores foram 4,5 g kg<sup>-1</sup> e 6,8 g kg<sup>-1</sup>; e no colmo, 3,3 g kg<sup>-1</sup> e 6,3g kg<sup>-1</sup>. Nas plantas acumuladoras de Si, a maior concentração do Si encontra-se no colmo e nas folhas. Estes resultados concordam com Camargo et al. (2010), que mencionam que o Si na palha é superior ao Si nas folhas verdes do topo, devido à acumulação e a quase nula redistribuição. Do Si acumulado, 99% encontra-se na forma de ácido silícico polimerizado de difícil solubilização, ou seja, depois de depositado o elemento não é redistribuído (MENEGALE; CASTRO; MANCUSO, 2015).



**Figura 2.** Teores médios ( $\pm$ desvio padrão) de silício nas folhas verde do topo (FVT) e palhada (P) (c); e nos colmos (d) de plantas de cana-de-açúcar com 24 meses de idade e cultivadas em Neossolo Quartzarênico submetidos a doses de AgroSilica. \*, \*\*significativo a 5 e 1% de probabilidade pela ANOVA. Valores médios seguidos pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

O teor de Si no colmo foi maior do que o controle para todas as doses testadas (Figura 2d), evidenciando a maior disponibilidade de Si no solo com a aplicação do fertilizante silicatado.

Pati et al. (2016) também obtiveram incrementos da absorção de Si com o aumento das doses de Si na forma de silicato amorfo. O incremento da acumulação de Si nos colmos diminuiu o acamamento devido ao aumento da resistência mecânica das plantas; esse efeito ocorre pela acumulação do Si nas paredes celulares, o que incrementa a rigidez dos tecidos (RAVEN, 1983; ANDRESS et al., 2015).

### 5.3.3. Efeito do Si na absorção de macro e micronutrientes na cana-de-açúcar

Na dose 750 kg ha<sup>-1</sup>, os teores de macronutrientes (Tabela 3), com exceção do N, encontram-se dentro da faixa considerada suficiente para a cana-de-açúcar (18-25g kg<sup>-1</sup> de N; 1,5-3,0g kg<sup>-1</sup> de P; 10-16g kg<sup>-1</sup> de K; 2-8g kg<sup>-1</sup> de Ca; 1-3g kg<sup>-1</sup> de Mg), proposta por Raij et al. (1997).

O teor de N incrementou diretamente proporcional ao incremento das doses de Si (Tabela 2), sendo estatisticamente superior a partir da dose 500 kg ha<sup>-1</sup>, obtendo incremento de 37 % na dose mais alta em relação ao controle. Este resultado pode ser atribuído à relação do Si com o aumento significativo da absorção do N (HUANG et al., 1997, ETESAMI; JEONG, 2018). Além do incremento da eficiência do uso de N, o Si participa na transformação do metabolismo primário estimulando a remobilização de aminoácidos na planta (DETMANN et

al. 2012). Melhor absorção de N foram observados em trigo fertilizados com doses crescentes de uma fonte silicatada (MALI; AERY, 2008).

Os teores de P na folha diagnose (folha +3) também mostraram incrementos significativos diretamente proporcionais às doses, embora a partir da dose 250 kg ha<sup>-1</sup>, os teores já estão dentro da faixa suficiente para o cultivo da cana. O maior teor deste elemento foi encontrado na dose de 750 kg ha<sup>-1</sup>, representando um incremento do 31% em relação ao controle. Este incremento da disponibilidade pode ser devido a uma interação competitiva e à troca com o Si (SMYTH; SANCHEZ, 1980), pelo baixo teor de óxidos de Fe e Al, principalmente nos solos arenosos, e também devido á fertilização com fonte de Si (MA, 2004; SINGH et al., 2006). O Si melhora a utilização de P (ENEJI et al., 2008) mediante mecanismos dentro da planta (incremento da fosforilação) (MA; TAKAHASHI, 1990; ETESANI; JEONG, 2018).

**Tabela 3.** Teores médios ( $\pm$ desvio padrão) dos nutrientes na folha diagnose +3 de plantas de cana-de-açúcar com 24 meses de idades, e, cultivadas em Neossolo Quartzarênico submetido a doses de AgroSilica

Nutrientes		Diatomita (kg ha <sup>-1</sup> )				
		0	125	250	500	750
N	g kg <sup>-1</sup>	12,5 $\pm$ 0,4 <b>b</b>	13,6 $\pm$ 0,3 <b>b</b>	14,4 $\pm$ 0,2 <b>b</b>	15,0 $\pm$ 0,2 <b>ab</b>	17,8 $\pm$ 2,0 <b>a</b>
P	g kg <sup>-1</sup>	1,3 $\pm$ 0,1 <b>d</b>	1,5 $\pm$ 0,0 <b>c</b>	1,5 $\pm$ 0,0 <b>bc</b>	1,6 $\pm$ 0,0 <b>b</b>	1,7 $\pm$ 0,0 <b>a</b>
K	g kg <sup>-1</sup>	7,7 $\pm$ 0,7 <b>c</b>	9,0 $\pm$ 0,2 <b>b</b>	9,6 $\pm$ 0,0 <b>b</b>	10,0 $\pm$ 0,2 <b>b</b>	12,1 $\pm$ 0,8 <b>a</b>
Ca	g kg <sup>-1</sup>	3,9 $\pm$ 0,3 <b>d</b>	4,7 $\pm$ 0,1 <b>c</b>	5,1 $\pm$ 0,2 <b>c</b>	6,0 $\pm$ 0,2 <b>b</b>	6,9 $\pm$ 0,4 <b>a</b>
Mg	g kg <sup>-1</sup>	1,4 $\pm$ 0,1 <b>b</b>	1,7 $\pm$ 0,0 <b>ab</b>	1,8 $\pm$ 0,0 <b>ab</b>	1,9 $\pm$ 0,1 <b>ab</b>	2,4 $\pm$ 0,5 <b>a</b>
Fe	mg kg <sup>-1</sup>	58,0 $\pm$ 4,5 <b>d</b>	69,2 $\pm$ 1,2 <b>c</b>	72,5 $\pm$ 0,9 <b>bc</b>	74,3 $\pm$ 0,5 <b>b</b>	83,4 $\pm$ 2,7 <b>a</b>
Mn	mg kg <sup>-1</sup>	6,3 $\pm$ 0,5 <b>d</b>	8,2 $\pm$ 0,4 <b>c</b>	8,8 $\pm$ 0,1 <b>c</b>	9,9 $\pm$ 0,7 <b>b</b>	11,8 $\pm$ 0,4 <b>a</b>
Cu	mg kg <sup>-1</sup>	9,1 $\pm$ 1,1 <b>c</b>	12,0 $\pm$ 0,4 <b>b</b>	12,9 $\pm$ 0,4 <b>ab</b>	14,0 $\pm$ 0,3 <b>a</b>	14,9 $\pm$ 0,4 <b>a</b>
Zn	mg kg <sup>-1</sup>	9,9 $\pm$ 0,4 <b>c</b>	10,9 $\pm$ 0,1 <b>c</b>	11,4 $\pm$ 0,2 <b>bc</b>	12,1 $\pm$ 0,3 <b>b</b>	14,3 $\pm$ 1,2 <b>a</b>

Valores médios seguidos pela mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Incrementos significativos nos teores de K na planta em relação ao controle foram observados (Tabela 2), com um incremento do 57 % para a dose 750 kg ha<sup>-1</sup>. Apenas nas doses 500 e 750 kg ha<sup>-1</sup>, o teor de K nas folhas encontra-se dentro da faixa suficiente para a cana-de-açúcar. Outros autores também observaram que o Si também influencia na disponibilidade do K no solo (CHEN et al., 2016). O incremento da absorção de K<sup>+</sup> pode ser induzido por o Si mediante a diminuição da permeabilidade da membrana plasmática (KAYA; TUNA; HIGGS, 2006). Crooks e Prentice (2016), encontraram incrementos significativos de N, P, K, Si e micronutrientes na palha de arroz com cultivado num solo tratado com sílica amorfa.

Incrementos significativos nos teores de Ca e Mg foram também observados (Tabela 3), com valores que representam incrementos de 78% de Ca e 71 % de Mg para maior dose de Si com relação ao controle. Estes resultados concordam com pesquisadores que demonstraram que a fertilização silicatada está relacionada ao aumento dos níveis de Ca e Mg no solo e na planta (KAYA; TUNA; HIGGS, 2006; MALI; AERY, 2008).

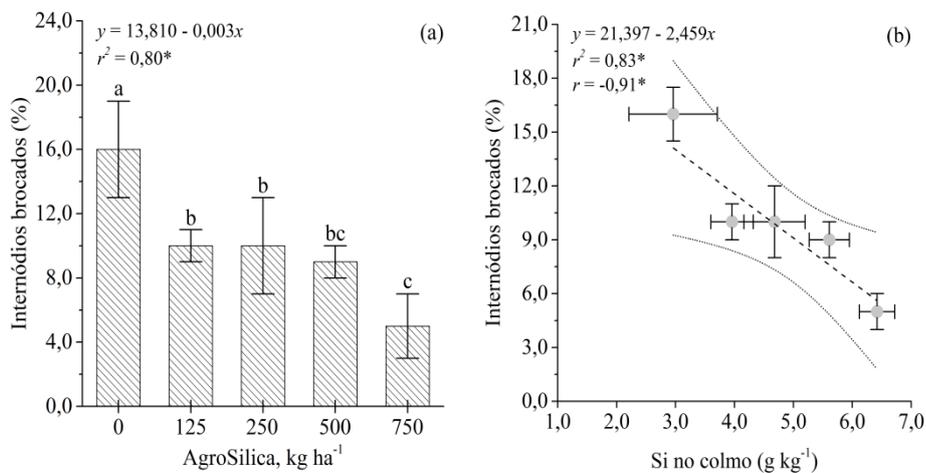
Os teores de Fe na planta mostraram incrementos significativos e proporcionais ao incremento das doses de sílica amorfa (Tabela 3). Si pode promover aumento no transporte de Fe da raiz até a parte aérea promovido mediante o aumento da expressão de transportadores que influem na absorção e translocação de Fe, principalmente sobre deficiência deste elemento (YOU-QIANG et al., 2012; TRIPATI et al., 2017; ETESAMI et al., 2018). O Si também participa na manutenção do equilíbrio de Fe/Mn, que beneficia a síntese de clorofila (ETESAMI et al. 2018), beneficiando o crescimento e a produção de biomassa. O incremento significativo dos teores de Mn em relação ao incremento das doses de aplicação observado, inclusive, pode ser devido ao fato de que a interação deste elemento com o Si é similar à interação de Si com o Fe (IWASAKI et al., 2002).

Nos teores do Zn e Cu também aumentaram significativamente em relação ao incremento das doses de Si aplicadas (Tabela 3). Os maiores teores foram encontrados com a dose de 750 kg ha<sup>-1</sup> em ambos casos. O Si participa na distribuição do Zn nas plantas, apresentando um sítio análogo nas plantas (GU et al., 2012), localizam-se perto próximo da endoderme da raiz (na forma de silicato de Zn), podendo alterar o transporte deste micronutriente pelo xilema (CUNHA; NASCIMENTO, 2009). Estes depósitos podem ser utilizados em condições de deficiência de Zn (ETESAMI; JEONG, 2018). O Si também participa na distribuição ou biodisponibilidade de Cu (LI et al., 2008), mediante a deposição nas paredes celulares evitando o excesso de Cu nas células vegetais (LIANG et al., 2007). Guntzer, Keller e Meunier (2012) também encontraram incrementos significativos de micronutrientes nas folhas de arroz quando foram tratadas com silício.

#### **5.3.4. Efeito do Si no ataque da broca da cana-de-açúcar (*Diatrea saccharalis*)**

Diminuição significativa dos internódios brocados com o incremento das doses de silício amorfo foi observado (Figura 3a). Nota-se que o tratamento controle o maior número de internódios brocados. Nas doses 250, 500 e 750 kg ha<sup>-1</sup>, foram obtidas reduções de 5, 11 e 22 % dos internódios brocados, respectivamente. Como visto na Figura 3b, há uma relação direta entre os teores de Si no colmo e a diminuição dos danos Keeping, Meyer e Sewpersad (2012),

também encontraram que com o aumento das concentrações de Si nos colmos, reduziu o dano da broca do colmo na cana-de-açúcar devido à deposição de Si, principalmente como fitólitos opalinos ou Si amorfo. Esses autores reportaram reduções de 19 e 33% no dano de pragas com a aplicação de 425 e 850 kg ha<sup>-1</sup> Si, respectivamente. Os mesmos autores encontraram reduções de 26 a 34% do dano por *Eldana saccharina*, inseto que causa danos parecido a *Diatraea saccharalis* (ELAWAD et al., 1982). A acumulação do Si nos nódulos e internódios permitem incrementos da resistência mecânica à penetração do colmo (KVEDARAS et al., 2005).



**Figura 3.** Valores médios ( $\pm$ desvio padrão) do percentual de internódios brocados pela Broca do colmo (*Diatraea saccharalis*) (a); correlação linear de Pearson entre o percentual de internódios brocados e os teores de Si no colmo (b) de plantas de cana-de-açúcar com 24 meses de idade e cultivadas em Neossolo Quartzarênico submetidos a doses de AgroSilica.  $r$  coeficiente de correlação linear de Pearson. \* e \*\* significativo a 5 e 1% de probabilidade pela ANOVA. Valores médios seguidos pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

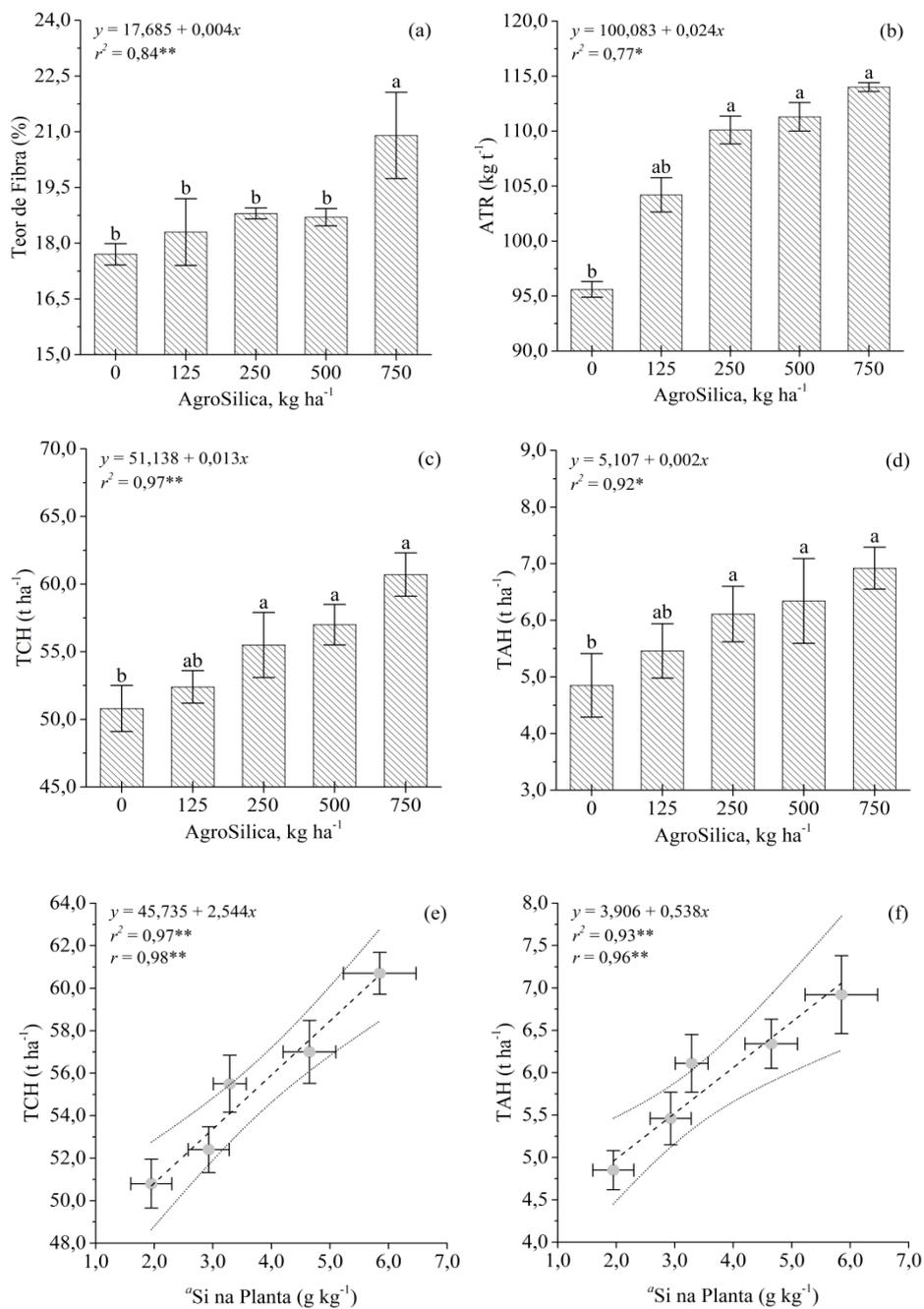
Camargo et al. (2014) mencionam que o conteúdo mínimo necessário para aumentar a resistência mediada pelo Si à broca é de 3g kg<sup>-1</sup>. Este valor é superado a partir da dose 125 kg (Figura 2d); portanto; os altos percentagens da redução dos internódios brocados era esperado. Keeping, Meyer e Sewpersad (2012) mencionam que o aumento na concentração total de Si nas plantas aumenta a resistência ao ataque de insetos. Em trabalho realizado por Garcia (2013), para cada 1% de índice de intensidade de infestação final da praga (número de entrenós atacados pelo complexo broca/podridão-vermelha), ocorrem prejuízos de 0,42% na produção de açúcar ou 0,25% na produção de álcool e mais 1,14 na produção de cana (TCH), sendo os prejuízos maiores em cana planta. A redução do ataque da broca também pode estar relacionada com a percentagem de fibra (CAMARGO et al., 2010), já que estes teores foram elevados pela aplicação do silício (Figura 4).

### 5.3.5. Efeito do Si nos na produtividade e parâmetros tecnológicos

Apenas na dose 750 kg ha<sup>-1</sup>, o teor de fibra foi estatisticamente superior ao controle (Tabela 4a). Leite et al. (2008), também encontraram diferenças significativas entre as doses aplicadas (150, 300 e 450 kg/há de silicato) e o teor de fibra em cana-de-açúcar, da mesma forma, Camargo et al., (2014), pelo contrário, não encontraram diferenças significativas nos teores de fibra em relação ao incremento da fertilização silicatada.

Com respeito a açúcar total recuperável (ATR) (Fig. 4b), encontraram-se incrementos significativos a partir da dose 250 kg ha<sup>-1</sup>, sendo este semelhante às doses de 500 e 750kg ha<sup>-1</sup>. Estes resultados podem ser atribuídos à baixa pureza, às elevadas teores de fibra (fig. 4a), aos efeitos da broca da cana e ao cultivar, pois o cultivar B061675 é novo, pouco conhecido e ainda está na fase de teste na Usina. Leite et al. (2008) demonstraram que com os incrementos das doses silicatada, diminuiu as percentagens de fibra e aumentaram os teores de ATR.

A produtividade da cana (TCH) apresentou incrementos significativos a partir da dose 250 kg ha<sup>-1</sup> com respeito ao controle (Figura 4c). Estes incrementos foram de 6% (54 t ha<sup>-1</sup>), 13% (58 t ha<sup>-1</sup>) e 19% (61 t ha<sup>-1</sup>) para as doses 250, 500 e 750kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, em relação ao controle. Estes incrementos são superiores à média obtida nas três últimas safras (50 t ha<sup>-1</sup>) e os dois maiores incrementos 58 e 61 t ha<sup>-1</sup> são superiores à produtividade média do estado da Paraíba 52 t ha<sup>-1</sup>, embora estes valores sejam menores à média nacional (76 t ha<sup>-1</sup>) (CONAB, 2019). Os teores de Si nas folhas foram diretamente correlacionados com TCH e TAH (Figuras 4e e 4f).



**Figura 4.** Teores médios ( $\pm$ desvio padrão) dos parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar colhida aos 24 meses de idade e cultivada em Neossolo Quartzarênico submetido a doses de AgroSilica (a – d); correlação linear de Pearson entre as produtividades da cana e do açúcar pelo teor de Si na cana-de-açúcar (e – f).  $r$  coeficiente de correlação linear de Pearson, ATR açúcar total recuperado, TCH tonelada de cana por hectare, TAH tonelada de açúcar por hectare,  $a$  média geométrica dos teores de Si no colmo, na palhada e nas folhas verdes do topo da cana-de-açúcar. \*, \*\*significativo a 5 e 1% de probabilidade pela ANOVA, valores médios seguidos pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

## 5.4. CONCLUSÃO

Os resultados mostraram os efeitos positivos da fertilização silicatada na forma de silicato amorfo (diatomita) na cultura de cana-de-açúcar em condições de campo. A diatomita disponibilizou Si à planta melhorando as características biométricas e absorção de macro e micronutrientes. O incremento da acumulação de Si no colmo originou diminuições significativas no dano causado por *D. saccharalis*. Deste modo, foi possível obter incrementos significativos na produtividade e características tecnológicas superiores.

## REFERÊNCIAS

- ADREES, M.; ALI, S.; RIZWAN, M.; ZIA-UR-REHMAN, M.; IBRAHIM, M.; ABBAS, FARID, M.; QAYYUM, M. F.; IRSHAD, M. K. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, New York, v. 119, p. 186-197, 2015.
- AGARIE, S.; HANAOKA, N.; UENO, O.; MIYAZAKI, A.; KUBOTA, F.; AGATA, W.; KAUFMAN, P. B. Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage. **Plant Production Science**, Tokyo, v. 1, n. 2, p. 96-103, 1998.
- ASHRAF, M.; AFZAL, M.; AHMED, R.; MUJEEB, F.; SARWAR, A.; ALI, L. Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt-sensitive and salt-tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Plant and Soil**, Netherlands, v. 326, n. 1-2, p. 381-391, 2010.
- CAMARGO, M. S. de; KORNDÖRFER, G. H.; WYLER, P. Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. **Field Crops Research**, Netherlands, v. 167, p. 64-75, 2014.
- CAMARGO, M.S. de; ROCHA, G.; KORNDÖRFER, G.H. Silicate fertilization of tropical soils: silicon availability and recovery index of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.5, p.1267-1275, 2013
- CAMARGO, M.S.; KORNDORFER, 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**, Campinas, v.69, n.4, p.937-944, 2010.
- CHEN, D.; CAO, B.; WANG, S.; LIU, P.; DENG, X.; YIN, L.; ZHANG, S. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific Reports**, London, v. 6, p. 22882, 2016.
- CLIMATE-Data.Org. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/location/4451/>. Acesso em: 25 out. 2017.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília: Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 28 Ene. 2019.

CROOKS, R.; PRENTICE, P. Extensive investigation into field based responses to a silica fertiliser. **Silicon**, v.9, n.2, p.301-304, 2017.

CUNHA, K. P. V. da; NASCIMENTO, C. W. A. do. Silicon effects on metal tolerance and structural changes in maize (*Zea mays* L.) grown on a cadmium and zinc enriched soil. **Water, Air, and Soil Pollution**, Netherlands, v. 197, n. 1-4, p. 323, 2009.

DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. 424p. ISSN: 0928-3420

DETMANN, K. C.; ARAÚJO, W. L.; MARTINS, S. C.; SANGLARD, L. M.; REIS, J. V.; DETMANN, E.; RODRIGUES, A. N.; FERNI, A. R.; DAMATTA, F. M. Silicon nutrition increases grain yield, which, in turn, exerts a feed-forward stimulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. **New Phytologist**, Lancaster, v. 196, n. 3, p. 752-762, 2012.

ELAWAD, S. H.; GASCHO, G. J.; STREET, J. J. Response of Sugarcane to Silicate Source and Rate. I. Growth and Yield I. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, n. 3, p. 481-484, 1982.

EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2009. 627p.

ENEJI, A. E.; INANAGA, S.; MURANAKA, S.; LI, J.; HATTORI, T.; AN, P.; TSUJI, W. Growth and nutrient use in four grasses under drought stress as mediated by silicon fertilizers. **Journal of Plant Nutrition**, Weinheim, v. 31, n. 2, p. 355-365, 2008.

EPSTEIN, E. Silicon: its manifold roles in plants. **Annals of Applied Biology**, v. 155, n. 2, p. 155-160, 2009.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings National Academy Science**, Washington, v. 91, n. 1, p. 11-17, 1994.

ETESAMI, H.; JEONG, B. R. Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, New York, v. 147, p. 881-896, 2018.

GARCIA F.F. Manual de identificação de pragas da cana. Capinas 219 p. 2013

GU, H. H.; ZHAN, S. S.; WANG, S. Z.; TANG, Y. T.; CHANEY, R. L.; FANG, X. H.; ...; QIU, R. L. Silicon-mediated amelioration of zinc toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. **Plant and Soil**, v. 350, n. 1-2, p. 193-204, 2012.

GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J-D. Benefits of plant silicon for crops: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, France, v. 32, n. 1, p. 201-213, 2012.

HAYNES, R.J. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v.177, n.6, p.831-844, 2014.

HUANG, X.; ZHANG, Z.; KE, Y.; XIAO, C.; PENG, Z.; WU, L.; Li, Y.; Jian, H.; Cen, J.; Zhang, Y.; ZHONG, S. Effects of silicate fertilizer on nutrition of leaves, yield and sugar of sugarcane. **Trop Subtrop Soil Science**, Tokyo, v. 6, p. 242-6, 1997.

IWASAKI, K.; MAIER, P.; FECHT, M.; HORST, W. J. Leaf apoplastic silicon enhances manganese tolerance of cowpea (*Vigna unguiculata*). **Journal of Plant Physiology**, California, v. 159, n. 2, p. 167-173, 2002.

KAYA, C.; TUNA, L.; HIGGS, D. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. **Journal of Plant Nutrition**, Weinheim, v. 29, n. 8, p. 1469-1480, 2006.

KEEPING, M. G.; MEYER, J. H.; SEWPERSAD, C. Soil silicon amendments increase resistance of sugarcane to stalk borer *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae) under field conditions. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 363, n. 1-2, p. 297-318, 2013.

KEEPING, M. G.; KVEDARAS, O. L.; BRUTON, A. G. Epidermal silicon in sugarcane: cultivar differences and role in resistance to sugarcane borer *Eldana saccharina*. **Environmental and Experimental Botany**, Netherlands, v. 66, n. 1, p. 54-60, 2009.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. Análise de silício no solo, planta e fertilizante. Uberlândia: Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia GPSi-ICIAG-UFU, 2004. 50 p. Boletim técnico 02.

KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; CAMARGO, M.S de. Papel do silício na produção de cana-de-açúcar. **Revista STAB**, Piracicaba, v.21, n.1, p.6-9, 2002.

KORNDÖRFER, G. H.; COELHO, N. M.; SNYDER, G. H.; MIZUTANI, C. T. Avaliação de métodos de extração de silício para solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.101-106, 1999.

KVEDARAS, O.L.; KEEPING, M.G.; GOEBEL, R.; BYRNE, M. Effects of silicon on the African stalk borer *Eldana saccharina* (Lepidoptera: Pyralidae) in sugarcane. **Proceeding of South African Sugar Technology Association**, Mount Edgecombe, v.79, p.359-362, 2005.

LEITE, G.M.V.; ANDRADE, L.A. DE B.; GARCIA J.C.; ANJOS, I.A. Efeito de fontes e doses de silicato de cálcio no rendimento agrícola e na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar cultivar SP80 1816. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras v.32, n.4, p.1120-1125, 2008.

LI, J.; LEISNER, S. M.; FRANTZ, J. Alleviation of copper toxicity in *Arabidopsis thaliana* by silicon addition to hydroponic solutions. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, New York, v. 133, n. 5, p. 670-677, 2008.

LIANG, Y.; NIKOLIC, M.; BÉLANGER, R.; GONG, H.; SONG, A. **Silicon in agriculture: From theory to practice**. Berlin: Springer, 2015. 255p.

LIANG, Y.; SUN, W.; ZHU, Y. G.; CHRISTIE, P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. **Environmental Pollution**, New York, v. 147, n. 2, p. 422-428, 2007.

MA, J. F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v. 50, n. 1, p. 11-18, 2004.

MA, J.; TAKAHASHI, E. The effect of silicic acid on rice in a P-deficient soil. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 126, n. 1, p. 121-125, 1990.

MALI, M.; AERY, N. Influence of silicon on growth, relative water contents and uptake of silicon, calcium and potassium in wheat grown in nutrient solution. **Journal of Plant Nutrition**, Weinheim, v.31, n.11, p.1867-1876, 2008.

MANECHINI, C.; DONZELLI, J. L. **Recomendação da adubação e calagem com base na análise e características dos solos**: princípios e aplicações. Piracicaba: Copersucar, 1984.

MARQUES, T. A.; DA SILVA, W. H. Crescimento vegetativo e maturação em três cultivares de cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Sergipe, v. 8, n. 1, 2008.

MEENA, V. D.; DOTANIYA, M. L.; COUMAR, V.; RAJENDIRAN, S.; KUNDU, S.; RAO, A. S. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: **Biological Sciences**, Maringá, v. 84, n. 3, p. 505-518, 2014.

MENEGALE, ML de C.; CASTRO, G. S. A.; MANCUSO, M. A. C. Silício: interação com o sistema solo-plantas. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v.4, p.435-454, 2015.

NASCIMENTO, C. W. A. do; CUNHA, K. P. V.; RODRIGUES, F. A. Silício e tolerância de plantas a metais pesados e doenças. In: RIBEIRO, M. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciências do solo, 2009, v.6, p. 273-318.

PATI, S.; PAL, B.; BADOLE, S.; HAZRA, G.C.; MANDAL, B. Effect of silicon fertilization on growth, yield, and nutrient uptake of rice. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.47, n.3, p.284-290, 2016.

PEREIRA, H.S.; GAMA, A.J.M.; CAMARGO, M.S.D.; KORNDORFER, G.H. Reatividade de escórias silicatadas da indústria siderúrgica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.34, n.2, p.382-390, 2010.

PEREIRA, H.S.; KORNDÖRFER, G.H.; VIDAL, A.A.; CAMARGO, M.S. Silicon sources for rice crop. **Scientia Agrícola**, São Paulo, v.61, n.5, p.522-528, 2004.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162004000500010>

RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews**, Cambridge, v. 58, n. 2, p. 179-207, 1983.

REYNOLDS, O. L.; KEEPING, M. G.; MEYER, J. H. Silicon-augmented resistance of plants to herbivorous insects: a review. **Annals of Applied Biology**, England, v. 155, n. 2, p. 171-186, 2009.

SINGH, K.; SINGH, R.; SINGH, J. P.; SINGH, Y.; SINGH, K. K. Effect of level and time of silicon application on growth, yield and its uptake by rice (*Oryza sativa*). **Indian Journal of Agricultural Science**, Nova Delhi, v. 76, n. 7, p. 410-413, 2006.

SMYTH, T. J.; SANCHEZ, P. A. Effects of Lime, Silicate, and Phosphorus Applications to an Oxisol on Phosphorus Sorption and Ion Retention 1. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 3, p. 500-505, 1980.

TRIPATHI, D. K.; SINGH, V. P.; AHMAD, P.; CHAUHAN, D. K.; PRASAD, S. M. **Silicon in plants: advances and future prospects**. London: CRC Press, 2016. 399 p.

TRIPATHI, D. K.; SINGH, V. P.; PRASAD, S. M.; CHAUHAN, D. K.; DUBEY, N. K.; RAI, A. K. Silicon-mediated alleviation of Cr (VI) toxicity in wheat seedlings as evidenced by chlorophyll fluorescence, laser induced breakdown spectroscopy and anatomical changes. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, New York, v. 113, p. 133-144, 2015.

YOU-QIANG, F. U.; HONG, S. H. E. N.; DAO-MING, W. U.; KUN-ZHENG, C. A. I. Silicon-mediated amelioration of Fe<sup>2+</sup> toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) roots. **Pedosphere**, Netherlands, v. 22, n. 6, p. 795-802, 2012.

ZHU, Y.; GONG, H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris. v. 34, n. 2, p. 455-472, 2014.