

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA**

ANA PAULA GOMES

**APROVEITAMENTO DE SILÍCIO PROVENIENTE DE AGREGADO
SIDERÚRGICO POR DUAS VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**Uberlândia – MG
Outubro – 2011**

ANA PAULA GOMES

**APROVEITAMENTO DE SILÍCIO PROVENIENTE DE AGREGADO
SIDERURGICO POR DUAS VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso de Agronomia, da Universidade
Federal de Uberlândia, para obtenção do
grau de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Gaspar Henrique Korndörfer

**Uberlândia – MG
Outubro – 2011**

ANA PAULA GOMES

**APROVEITAMENTO DE SILÍCIO PROVENIENTE DE AGREGADO
SIDERURGICO POR DUAS VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso de Agronomia, da Universidade
Federal de Uberlândia, para obtenção do
grau de Engenheiro Agrônomo.

Aprovado pela Banca Examinadora em 21 de Novembro de 2011.

Eng^o Agr^o Mestrando Gustavo A. Santos
Membro da Banca

Eng^a Agr^a Mestranda Welldy G. Teixeira
Membro da Banca

Prof. Dr. Gaspar Henrique Korndörfer
Orientador

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma espécie acumuladora de silício (Si), capaz de responder à adubação silicatada, principalmente, em solos pobres desse elemento. Os agregados siderúrgicos constituem em uma interessante fonte de Si para aplicação em solos cultivados com essa cultura. Objetivou-se estudar o aproveitamento do Si proveniente de agregado siderúrgico pela cana-de-açúcar. Conduziu-se o experimento, em Uberlândia-MG, entre 15 de agosto de 2007 a 02 de maio de 2008. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso em esquema fatorial 2x4, sendo duas variedades de cana-de-açúcar (SP81 – 3250 e RB86 – 7515) e quatro doses de Si (0, 100, 200 e 400 kg ha⁻¹) em quatro repetições. A cana foi cultivada em tambores plásticos (200 L). A aplicação de agregado siderúrgico (silicato) aumentou o teor de Si disponível no solo e o teor foliar da cana-de-açúcar. A quantidade de Si acumulada pela parte aérea da cana proveniente do silicato aplicado variou entre 23 e 56%, respectivamente para as variedades RB86-7515 e SP81-3250. Em média, 39% do Si absorvido pela parte aérea da cana foram provenientes do fertilizante aplicado (silicato).

Palavras-chave: Silicato, Si solúvel, recuperação de silício, Si acumulado.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	7
2.1	O Si no solo.....	7
2.1.2	Aplicação de silicatos no solo.....	8
2.1.3	Uso dos agregados siderúrgicos como fonte de Si para as plantas	8
2.1.4	Efeitos de Si na redistribuição do Manganês e disponibilidade de Fósforo no solo.....	9
2.2	Si nas plantas.....	10
2.2.2	Efeito do silício na resistência das plantas às pragas e doenças	13
3	MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1	Área experimental.....	14
3.2	Condução do experimento	14
3.3	Avaliações.....	16
3.3.1	Massa seca da parte aérea	16
3.3.2	Análise de Si foliar.....	17
3.3.3	Análise de Si solúvel no solo	17
3.4	Análises estatísticas	17
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
4.1	Análise de Si solúvel no solo	18
4.2	Análise de Si foliar.....	20
5	CONCLUSÕES	27
	REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a cana-de-açúcar destaca-se não apenas pela sua importância como fonte de matéria-prima para a produção de açúcar, mas, particularmente, por se constituir em insumo básico para a produção do etanol que abastece os automóveis e ajuda a romper o domínio dos combustíveis fósseis sobre nossa sociedade (JAN, 2008). O Brasil destaca-se no cenário mundial como o maior produtor de cana-de-açúcar (BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E DA PECUÁRIA, 2007). No entanto, muitas das áreas sob cultivo dessa cultura no país caracterizam-se por apresentarem solos bastantes intemperizados e, portanto, pobres em silício (Si) solúvel ou disponível às culturas.

A cana-de-açúcar é uma espécie acumuladora de Si, apresentando entre 0,14% desse elemento nas folhas jovens até 6,7% nos colmos e folhas velhas (KORNDÖRFER; DATNOFF, 1995). Diversos estudos (PEREIRA et al., 2004; CARVALHO; PUPATTO, 2003; BERNI; PRABHU, 2003) têm demonstrado que as gramíneas respondem favoravelmente à adubação silicatada, particularmente quando cultivada em solos com baixos teores de Si “disponível”.

Vários são os benefícios do Si para a cana-de-açúcar, dentre os quais, o aumento da eficiência fotossintética e da resistência ao ataque de pragas e doenças, maior tolerância à falta de água durante os períodos de baixa umidade do solo (KORNDÖRFER; DATNOFF, 1995), alívios de danos causados por geada e da melhoria da arquitetura das plantas (SAVANT et al., 1999), dentre outros. Tais benefícios têm como reflexos melhorias na qualidade tecnológica e aumentos de produtividade dessa cultura.

Os agregados siderúrgicos, provenientes da produção do aço e do ferro-gusa, constituídos basicamente de silicatos de cálcio e magnésio, desde que não se constituam em fontes de contaminação do solo com metais pesados, podem atender satisfatoriamente a características ideais como fonte de Si para uso agrícola como: alto conteúdo de Si solúvel, facilidade de aplicação mecanizada, adequadas relações e quantidades de cálcio (Ca) e magnésio (Mg), custo reduzido e baixo potencial de contaminação do solo com metais pesados. (KORDÖRFER et al., 2004).

Embora o aproveitamento agrícola de resíduos industriais, como os agregados siderúrgicos, seja pouco comum no Brasil, apesar da grande quantidade disponível, seu uso no fornecimento de Si para as plantas é estudado e praticado em várias partes do mundo (PRADO; FERNANDES, 2001).

Considerando que parte do silício absorvido/acumulado pelas plantas é proveniente do solo e parte proveniente do Si aplicado na forma de fertilizante, objetivou-se neste trabalho avaliar as diferenças varietais quanto à absorção de Si e a quantidade de Si acumulado na parte aérea de plantas de cana-de-açúcar proveniente do agregado siderúrgico.

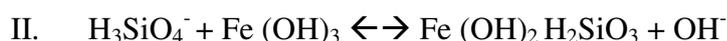
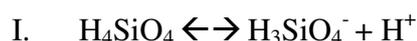
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O Si no solo

O silício é o segundo elemento em maior abundância na crosta terrestre, perdendo apenas para o oxigênio. Ocorre principalmente como mineral inerte das areias, quartzo (SiO_2 puro), caulinita, micas, feldspato e em outros argilominerais silicatados (MENGEL; KIRKBY, 1987).

O silício está presente na solução do solo como ácido monossilícico (H_4SiO_4), em grande parte na forma não dissociada, que é facilmente absorvido pelas plantas (RAVEN, 1983). Por isso, apesar de ser um ácido, o Si possui comportamento de base, sendo representado por alguns autores como $\text{Si}(\text{OH})_4$ ao invés de H_4SiO_4 (MENGEL; KIRKBY, 1987; SAVANT et al., 1997). O ácido silícico é a única forma disponível de silício para as plantas, porém diversos fatores podem influenciar o seu teor no solo. Os principais fatores que aumentam sua disponibilidade são: adição de fertilizantes silicatados, água de irrigação, dissolução de ácido silícico polimérico, liberação de silício dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, dissolução de minerais cristalinos e não cristalinos e decomposição de resíduos vegetais. Os principais drenos são: absorção pelas plantas, formação de polímeros de silício, lixiviação, formação de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e formação de minerais cristalinos (SAVANT et al., 1997).

A quantidade de Si presente nos solos tropicais pode ser de 5 a 10 vezes menor do que nos solos de regiões temperadas (McKEAGUE; CLINE, 1963; JUO; SANCHEZ, 1986; FOY, 1992). Vários pesquisadores acreditam que os sesquióxidos atuam como fonte de Si (DRESS et al., 1989). A concentração de Si na solução do solo (H_4SiO_4) pode variar de 3 a 17 mg dm^{-3} , sendo que o equilíbrio químico do elemento no solo depende principalmente do pH, como mostra as equações abaixo (DRESS et al., 1989; EPSTEIN, 1994)



2.1.2 Aplicação de silicatos no solo

Na maioria dos solos ocorrem, naturalmente, consideráveis quantidades de silício. Apesar disso, cultivos consecutivos podem reduzir os teores desse elemento a um ponto em que a sua adição pela adubação seja necessária. As análises de solo e/ou de folhas são ferramentas imprescindíveis para uma boa recomendação de Si para as plantas.

A quantidade de Si a ser aplicada no solo precisa ser definida ou calibrada com mais critérios. Entretanto, quanto mais Si for absorvido pelas plantas, maiores serão as chances de se obter resultados positivos e/ou benéficos no controle de pragas e doenças e na produtividade das culturas (KORNDÖRFER et al., 2004). Ainda não se constatou efeito tóxico do Si, não havendo, portanto, limites técnicos para aplicação desse insumo. O limite acontece quando se leva em conta o efeito corretivo dos silicatos e a relação custo/benefício, isto é, doses excessivas de silicato podem provocar aumentos de pH acima de valores desejados, podendo causar desequilíbrios nutricionais, principalmente deficiências de micronutrientes (Cu, Fe, Zn e Mn) e P, devido as reações de insolubilização.

Um cuidado necessário na escolha dos agregados como fontes de silício é o teor de metais pesados. Para que as fontes de Si sejam empregadas na agricultura, seria necessária a neutralização da atividade dos metais pesados dessas fontes, algumas vezes presentes em altas concentrações, o que poderia provocar sérios problemas ambientais.

As fontes de silício comercialmente utilizadas são os metassilicatos de sódio e de potássio (preferidos em cultivos hidropônicos e em aplicações foliares devido à alta solubilidade) e ácido silícico, com efeitos e utilização semelhantes. Outra forma é a utilização de agregados básicos de siderurgia (silicatos de cálcio e magnésio), que constituem excelentes fontes de silício a baixo custo, além do possível uso destes como corretivos do solo devido a sua basicidade (KONDORFER; DATNOFF, 1995; PIAU, 1995; DATNOFF, 2001). A wollastonita (silicato de cálcio natural) é frequentemente empregada em trabalhos de pesquisa envolvendo o elemento silícico, por ser livre de contaminantes como o ferro e o fósforo (RODRIGUES, 2000).

2.1.3 Uso dos agregados siderúrgicos como fonte de Si para as plantas

As características consideradas ideais de uma fonte de Si para fins agrícolas são: alta concentração de Si-solúvel em água ou soluções de ácidos orgânicos, boas propriedades

físicas, facilidade para a aplicação mecanizada, pronta disponibilidade para as plantas, boa relação e quantidades de cálcio (Ca) e magnésio (Mg), baixa concentração de metais pesados e baixo custo (EPAMIG, 2007).

Apesar da grande quantidade disponível de resíduos industriais (aproximadamente três milhões de toneladas por ano) no Brasil, estes materiais são pouco empregados na agricultura, diferentemente de outras partes do mundo, como o Japão, onde o emprego dos resíduos é amplamente estudado e aplicado às atividades agrícolas (PRADO; FERNANDES, 2001).

Segundo a legislação brasileira (BRASIL, 1982), os materiais considerados corretivos de acidez do solo devem cumprir sua principal finalidade, sem, contudo, trazer conseqüência danosa ao sistema. Os produtos que podem ser utilizados na correção da acidez contem, como constituintes, neutralizantes óxidos, hidróxidos, carbonatos e silicatos de cálcio e magnésio (ALCARDE, 1983, 1985; QUAGGIO, 1986).

A composição química dos agregados varia de acordo com a matéria-prima utilizada para a fundição do ferro e do aço. Dentre os principais constituintes de um agregado siderúrgico destaca-se a grande concentração de óxidos de Cálcio, Magnésio, Silício, Ferro e Manganês (PRADO; FERNANDES, 2001). A presença dos silicatos de cálcio e magnésio na composição química dos agregados resume a potencialidade de seu uso na agricultura, já que a reação destes materiais no solo promove a correção da acidez do solo (KORNDÖRFER et al., 2004).

Um agregado siderúrgico para ser usado na agricultura deve apresentar granulometria adequada, ação neutralizante da acidez do solo e presença de elementos nutrientes. Além dessas características positivas, a presença de metais pesados deve ser analisada pelo aspecto ambiental de contaminação do solo e das coleções hídricas superficiais e subterrâneas.

2.1.4 Efeitos de Si na redistribuição do Manganês e disponibilidade de Fósforo no solo

O Si influencia a absorção e a translocação de vários macro e micronutrientes e freqüentemente diminui ou elimina o efeito adverso do excesso de metais no meio sobre as plantas, especialmente do Mn^{2+} (EPSTEIN, 1994).

Interações diretas entre o Si e Mn durante a absorção são pouco prováveis, pois o Mn é absorvido como cátion divalente enquanto o ácido silícico (H_4SiO_4) é a forma na qual o Si é absorvido e translocado (HORST; MARSCHNER, 1978). Contudo, o aumento da tolerância

das plantas ao Mn^{2+} pode estar relacionado à maior absorção e distribuição do Si (FOY et al., 1978).

Os possíveis mecanismos de aumento da tolerância das plantas ao Mn^{2+} pelo Si são contraditórios. Enquanto alguns pesquisadores observaram que o Si aumenta a tolerância ao Mn^{2+} , por diminuir sua absorção (MIYAKE; TAKAHASHI, 1985; MA; TAKAHASHI, 1990a; MA; TAKAHASHI, 1990b), outros demonstram que, pelo menos em gramíneas, a absorção de Mn^{2+} não foi diminuída pelo Si, mas houve aumento da tolerância interna (HORIGUCHI, 1988), resultado da distribuição homogênea do Mn nas folhas, o que preveniu a formação de acúmulos localizados (HORST; MARSCHNER, 1978).

A deficiência de fósforo (P) é um dos fatores mais limitantes da produtividade agrícola, devido às reações de precipitação e ao fenômeno físico de adsorção ao complexo coloidal do solo (SOUZA et al., 2002). Cerca de 80% dos fertilizantes fosfatados adicionados aos solos, sobretudo aqueles intemperizados das regiões tropicais, constituídos de óxidos de ferro e alumínio, tornam-se indisponíveis pela fixação de P por esse fenômeno (HEDLEY et al., 1990).

Evidências têm sido mostradas de que o silício tem papel no metabolismo do fósforo, sendo ambos adsorvidos nos mesmos sítios (KHALID; SILVA, 1980). A similaridade química das duas formas aniônicas de P e Si ($H_2PO_4^-$ e $H_3SiO_4^-$), são a grande responsável por isso (HINGSTON et al., 1972).

A adsorção de Si pelas superfícies dos argilominerais do solo, precedente a aplicação de P, parece promissora por aumentar a disponibilidade de P em solo altamente fixador de fosfato, visto que, os ânions silicatos são conhecidos competidores com os fosfatos pelos mesmos sítios de adsorção do solo (FASSBENDER, 1987), de maneira que o radical SiO_4^- pode deslocar ou dessorver o PO_4^- , ou vice-versa, da fase sólida para a líquida (LEITE, 1997).

2.2 Si nas plantas

As plantas absorvem o Si da solução do solo de forma passiva e o transportam via xilema sob a forma de ácido monossilícico. Sua distribuição nos tecidos vegetais relaciona-se diretamente à taxa transpiratória dos diferentes órgãos da planta, com variação, também, conforme a espécie. Assim, no grupo das acumuladoras de Si, com 10 a 15% de SiO_2 , há maior concentração desse elemento na parte aérea, o qual inclui as gramíneas como arroz e

cana-de-açúcar, alguns cereais e poucas dicotiledôneas. Já nas não acumuladoras, como a maioria das dicotiledôneas, com menos de 0,5% de SiO_2 , sua distribuição é uniforme em algumas espécies, enquanto que em outras há maior acúmulo nas raízes. O Si acumulado na planta encontra-se, em sua maior proporção, na forma de sílica amorfa hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) (FAQUIN, 1994).

Segundo Rajj (1991), as concentrações de Si nas gramíneas chegam a ser de 10 a 20 vezes maiores do que nas dicotiledôneas. Isso se dá pelo fato das gramíneas absorverem o Si da solução do solo de forma passiva, ou seja, o mesmo acompanha o fluxo de água que penetra nas raízes, ao passo que nas dicotiledôneas há mecanismos que evitam a absorção de quantidades elevadas do mesmo.

Após ser absorvido e transportado até a parte aérea, o ácido monossilícico deposita-se na forma de sílica amorfa hidratada inicialmente nos tecidos mais jovens e posteriormente vai acumulando-se rapidamente nas células senescentes, sob a forma de sílica polimerizada (SiO_2), também chamada de opala biogênica ou fitólitos (DAYANANDAM et al., 1983). Em geral, a concentração de sílica é maior nas folhas velhas do que na raiz e ocorre com maior intensidade nas gramíneas (RAFI; EPSTEIN, 1999).

Aumentos na disponibilidade de Si no solo são normalmente acompanhados por acréscimo da concentração desse elemento nas plantas, com resultados positivos no crescimento e na produtividade de diversas gramíneas, especialmente arroz e a cana-de-açúcar. O acúmulo de sílica nos órgãos de transpiração leva à formação de uma dupla camada de sílica logo abaixo da epiderme, a qual age como barreira mecânica contra a invasão de fungos e insetos (KORNDÖRFER et al., 2005). O Si acumulado é responsável por efeitos protetores contra estresses bióticos, pela prevenção contra a penetração física de insetos e/ou por tornar as células das plantas menos suscetíveis à degradação enzimática por fungos patogênicos (ALVAREZ; DATNOFF, 2001).

Dentre as múltiplas funções do Si em benefício das plantas, citam-se o seu papel na complexação do alumínio presente na solução do solo, com formação de Al-Si, e conseqüente redução da sua toxidez. Nas raízes, o Si polimeriza-se em sílica, a qual age na redução da captação de manganês pelas plantas e alivia, por conseguinte, estresses causados por esse elemento. Além disso, o Si melhora a disponibilidade de fósforo no interior dos tecidos vegetais, com conseqüente redução da deficiência do mesmo para as plantas (MA; TAKAHASHI, 2002). Os mesmos autores citam que a deposição de sílica no caule das plantas aumenta sua resistência e previne o acamamento, enquanto que nas folhas, reduz a

transpiração, com alívios de estresses hídricos e salinos. A sílica diminui os efeitos causados pelo excesso de nitrogênio, bem como aumenta a resistência das plantas a estresses bióticos.

O Si pode promover resistência das plantas a condições de estresse salino e falta de água, isso acontece provavelmente para garantir a integridade da membrana celular (ZUCCARINI, 2008), como observado em culturas de gramíneas, as quais em solos com excesso de salinidade e com baixa umidade, tiveram aumento dos níveis de enzimas antioxidantes, o aumento da capacidade fotossintética e do conteúdo de clorofila, o que parece criar condições de tolerância a esse tipo de estresse, em função da aplicação de Si.

O Si é um elemento químico envolvido em funções físicas de regulação da evapotranspiração, sendo também capaz de formar uma barreira de resistência mecânica a invasão de fungos para o interior da planta e de dificultar a ação de insetos sugadores e herbívoros (EPSTEIN, 1999). Segundo alguns autores (BIDWELL, 1974; MALAVOLTA, 1980; MARSCHNER, 1986; TAKAHASHI, 1995), a camada de sílica formada limita a perda d'água pelas folhas e dificulta a penetração e o desenvolvimento de hifas de fungos.

Prado e Fernandes (2000) demonstraram que a aplicação de agregados siderúrgicos, produto à base de silicato de cálcio, reduziu significativamente a senescência das folhas de cana-de-açúcar de 35,6% para 26,9%. Para esses mesmos autores, o uso desse material como fonte de Si para essa cultura pode incrementar ainda mais sua taxa fotossintética, em razão do prolongamento da vida útil das folhas, com reflexos na produtividade. Korndörfer et al., (2002) citam que plantas adubadas com Si possuem as folhas mais eretas e, em consequência disso são mais eficientes quanto à capacidade de absorção da luz solar e de realizar fotossíntese.

Os depósitos de sílica nos tecidos foliares promovem redução na taxa de transpiração (DAYANANDAM et al., 1983). Em ambientes como, por exemplo, a vegetação do Cerrado, o acúmulo de silício nos órgãos de transpiração provoca a formação de dupla camada de sílica (OLIVEIRA; CASTRO, 2002), que causa redução de transpiração por diminuir a abertura dos estômatos, limitando a perda de água (FARIA, 2000). Além do efeito na transpiração, o acúmulo de silício torna as folhas mais eretas e rígidas e com maior interceptação da luz, aumentando a eficiência fotossintética (MARSCHNER, 1995) e o uso da água e da luz (NWUGO; HUERTA, 2008).

O transporte a longa distância nas plantas é limitado aos vasos do xilema e grandes quantidades de Si são depositadas na parede celular desses vasos (BALASTRA ET AL., 1989). Isso pode ser importante para prevenir a compressão dos vasos xilemáticos quando a taxa de transpiração é elevada (RAVEN, 1983).

2.2.2 Efeito do silício na resistência das plantas às pragas e doenças

A adubação silicatada está relacionada à resistência das plantas a diversas doenças (JONES; HANDRECK, 1967). Todos os nutrientes podem influenciar a incidência e a severidade das doenças das plantas. Na literatura foram encontradas mais de 1200 citações dos efeitos variáveis dos nutrientes sobre as doenças (HUBER, 2002), sendo que, apenas para o Si não foram encontradas citações onde ele aumentasse a intensidade.

O Si tem efeito evidente em suprimir muitas doenças de plantas e ataques de pragas, e esse efeito pode ser descrito basicamente por duas hipóteses de mecanismos: Hipótese 1: Deposição de sílica leva a modificação na anatomia da planta, como por exemplo, aumento da espessura das células da epiderme, o que acarreta em defesa mecânica contra a infestação de pragas e doenças; Hipótese 2: Modificação nas propriedades fisiológicas e bioquímicas da planta, como por exemplo, produção de substâncias inibitórias a infecção do patógeno, tais como as fitoalexinas, os precursores da lignina, biossíntese de suberina e silicificação, assim o silício age como ativador de resistência (RODRIGUES et al., 2004; COTE-BEAULIEU et al., 2009).

A resistência induzida pelo Si apresenta similaridade com a Resistência Sistêmica Adquirida (SAR). Em ambos os casos, o potencial de defesa da planta aumenta e é maximizado após a infecção. Entretanto, a resistência induzida pelo Si é rapidamente perdida quando este elemento é removido do meio, enquanto a SAR é caracterizada por ser um efeito durável (FAWE et al., 1998). Essa diferença pode ser o resultado das propriedades do Si dentro da planta, requerido na forma solúvel, mas apresentando-se na forma polimerizada dentro da planta.

O acúmulo e a polimerização de Si na célula epidérmica, logo abaixo da cutícula, forma uma barreira mecânica denominada “dupla camada silício-cutícula”, ajudando a manter as folhas mais eretas, diminuindo a transpiração e protegendo as plantas contra o ataque de insetos-pragas e fungos (YOSHIDA et al., 1962 apud SAVANT et al., 1997). A água absorvida é perdida através da transpiração e o Si é acumulado nos tecidos das plantas. Este é depositado principalmente na parede celular, aumentando a rigidez das células (ADATIA; BESFORD, 1986). As células epidérmicas ficam mais grossas e com um grau maior de lignificação e/ou silicificação, formando uma barreira mecânica ao ataque de fungos e insetos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área experimental

O experimento foi conduzido em área experimental situado no Bloco 4C do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Campus Umuarama, Uberlândia-MG, (18°53'05"S e 48°15'37"W), simulando situação de campo, no período de 15 de agosto de 2007 a 02 de maio de 2008, conforme ilustra a Figura 1.

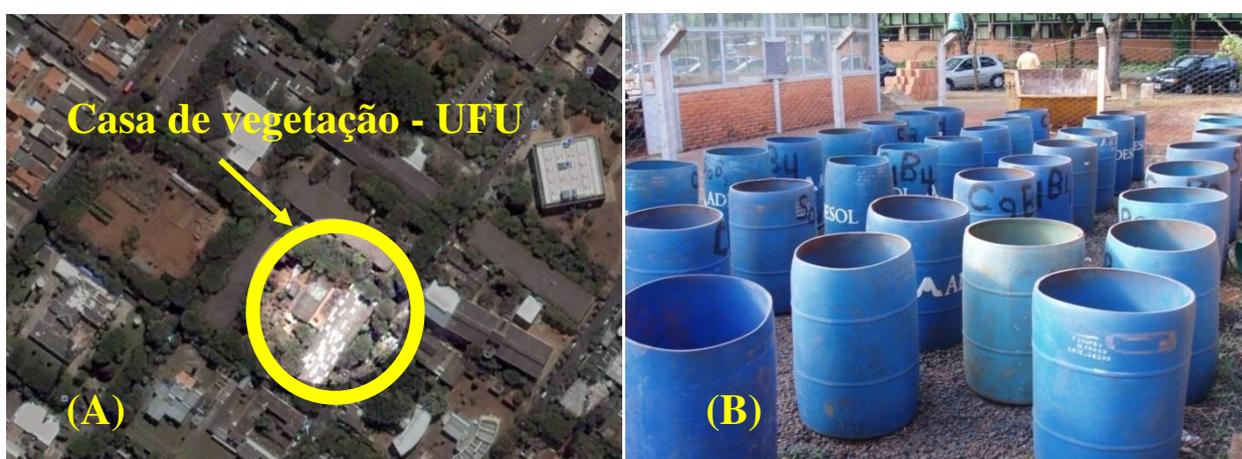


Figura 1. Vista aérea da casa de vegetação situada no campus Umuarama da Universidade Federal de Uberlândia (Fonte: Google Earth) (A) e vista frontal da área experimental (B).

3.2 Condução do experimento

Cada parcela experimental consistiu de um tambor de plástico, com capacidade para 200 L, preenchido com 200 kg de terra e onde foram plantadas três mudas de cana-de-açúcar (Figura 2). A terra utilizada nos tambores foi extraída dos primeiros 20 cm superficiais de um solo classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico A moderado, textura média, fase cerrado tropical subcaducifólio, relevo suave ondulado (EMBRAPA, 2006), situado no município de Uberlândia-MG, com as seguintes características químicas: matéria orgânica = 13 g dm⁻³; pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ (1:2,5) = 5,2; P Meh⁻¹ = 2,7 mg dm⁻³; K = 1; Ca = 7,0; Mg = 3,0; H + Al = 31,0 todos trocáveis em mmolc dm⁻³ e V = 27 %, (EMBRAPA, 1999). O

Si solúvel no solo, $4,3 \text{ mg dm}^{-3}$, foi determinado segundo metodologia descrita por Korndorfer et al. (2004a), utilizando como extrator o $\text{CaCl}_2 0,01 \text{ mol L}^{-1}$.

A escória de siderurgia (CaSiO_3) utilizada apresentou as seguintes características físicas e químicas: formulação pó, PRNT: 85%, CaO : 420 g kg^{-1} , MgO : 120 g kg^{-1} , SiO_2 : 230 g kg^{-1} , 112 g kg^{-1} Si total (determinado por colorimetria após a extração com ácido clorídrico e ácido fluorídrico, segundo metodologia descrita por Korndorfer et al 2004a, P_2O_5 : 4 g kg^{-1} , K_2O : 2 g kg^{-1} , SO_4 : 44 g kg^{-1} , Fe : 85 g kg^{-1} , Mn : 14 g kg^{-1} , Mo : $0,4 \text{ mg kg}^{-1}$ e Zn : $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições em esquema fatorial 2×4 , sendo duas cultivares de cana-de-açúcar (SP81 – 3250 e RB86 – 7515) e quatro doses de Si (0, 100, 200 e 400 kg ha^{-1}), totalizando 32 parcelas (tambores). As doses de agregado aplicadas foram de 0, 890, 1779 e 3559 kg há^{-1} , respectivamente e para ambas as cultivares.



Figura 2. Parcela experimental constituída por três mudas de cana-de-açúcar (A) e vista frontal da área experimental (B)

Anteriormente ao transplântio das mudas de cana-de-açúcar para os tambores, foram aplicadas quantidades pré-estabelecidas de calcário, com características físicas e químicas semelhantes às do agregado utilizado (PRNT 85%, $\text{CaO} = 420 \text{ g kg}^{-1}$ e $\text{MgO} = 120 \text{ g kg}^{-1}$), a fim de se evitar que as plantas que receberam doses maiores de agregado fossem favorecidas em função do Ca e Mg presente na mesma e a variação do pH, em detrimento daquelas que receberam doses menores do produto, aplicou-se, complementarmente às doses, calcário dolomítico nas doses de $3559, 2669, 1779$ e 0 kg ha^{-1} .

Com o intuito de se fornecer nutrientes em quantidades suficientes para atender a demanda das plantas de cana-de-açúcar, aplicaram-se, em todos os tratamentos, 100 kg ha^{-1}

nitrogênio (N); 300 kg ha⁻¹ fósforo (P₂O₅) (Sulfato de Amônio e Superfosfato Simples), 300 kg ha⁻¹ potássio (K₂O) (Cloreto de Potássio – KCl); 80 kg ha⁻¹ de um coquetel de micronutrientes (FTE - BR12), com a seguinte composição, 9% Zn; 1,8% B, 2% Mn, 0,8% Cu, 0,1% Mo e 3% Fe (BOLETIM TÉCNICO N° 100, 1996).

A quantidade de terra empregada em cada tambor foi dividida em duas porções de 100 kg cada, tendo-se incorporado em uma delas os nutrientes (macro e micronutrientes). Em seguida, essa terra foi colocada no fundo do tambor. À segunda porção de terra foram incorporados os nutrientes, o calcário e o agregado, e depois a mesma foi colocada dentro do vaso, sobre a primeira porção. Esse procedimento foi adotado para distribuir uniformemente os nutrientes por todo o tambor e deixar o calcário e o silicato apenas na primeira camada do solo. O próximo passo consistiu da adição de água na terra contida no tambor, até que se atingisse cerca de 70% da capacidade de campo da mesma (tendo-se empregado aproximadamente 32 L de água por tambor), a fim de se promover a reatividade dos produtos adicionados a terra.

As gemas que deram origem às mudas de cana foram plantadas no dia 15 de agosto de 2007 e transplantadas no dia 13 de setembro do mesmo ano (cerca de um mês após a germinação das mesmas). Foram transplantadas três mudas por tambor. Aos 87 dias após o transplântio das mudas, constatou-se deficiência de boro (B) nas plantas e aplicou-se 2,0 kg ha⁻¹ de ácido bórico por vaso. Aos 94 dias após o transplântio, constatou-se deficiência de nitrogênio, aplicando-se 200 kg ha⁻¹ de N, sob a forma de sulfato de amônio (20% de N), e em 98 dias aplicou-se, novamente, 2 kg ha⁻¹ de ácido bórico. Em janeiro de 2007 foram coletadas folhas (primeira folha do ápice para a base com a lígula visível – TVD ou Top Visible Dewlep) (KORNDÖRFER; RAMOS, 2008) para análise do teor foliar de Si. Aos 120 dias após o transplântio das mudas, foram retiradas amostras de solo para análise de Si solúvel. A colheita da cana-de-açúcar foi realizada oito meses após o transplântio das mudas.

3.3 Avaliações

3.3.1 Massa seca da parte aérea

A acumulação de Si pelas plantas foi estimada a partir da produção de matéria seca por parte das plantas e pelo teor foliar de Si. A matéria seca da parte aérea da planta é obtida através da massa seca da planta seca em estufa.

Logo após o corte, as plantas foram divididas em ponteiro (palmito + folhas) e colmos, os quais foram pesados. Os materiais vegetais foram moídos separadamente e

colocados para secar em estufa de circulação de ar, sob temperatura de 65 °C, até atingirem massa constante. Após seco, cada um dos três materiais obtidos foi novamente moído, em moinho tipo Willey, e acondicionado em saco plástico devidamente identificado e armazenado até ser submetido à análise para determinação do teor de Si.

3.3.2 Análise de Si foliar

Para determinação do Si na parte aérea das plantas adotou-se procedimentos analíticos descritos por Korndorfer et al. (2004a).

3.3.3 Análise de Si solúvel no solo

Após a colheita da cana, aos 260 dias, coletaram-se amostras de terra de cada tambor para análise do Si solúvel, utilizando como extrator o CaCl_2 0,01 mol L^{-1} segundo metodologia descrita por Korndorfer et al. (2004a).

3.4 Análises estatísticas

Os resultados qualitativos obtidos foram submetidos à análise de variância. Quando do teste F significativo as médias foram comparadas entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância, com o auxílio do programa SISVAR (Ferreira, 2000). Os resultados quantitativos foram submetidos à análise de regressão, tendo-se empregado, também, o programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2000).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de Si solúvel no solo

Os teores de Si no solo aumentaram linearmente com as doses do agregado, conforme se verificou nas análises realizadas aos 120 e 260 dias após a aplicação das mesmas (Figura 3). A análise realizada aos 120 dias após a aplicação do agregado indicou aumentos de 18, 56 e 72% nos teores de Si, conforme se aplicaram 100, 200 e 400 kg ha⁻¹ Si, respectivamente, quando comparadas ao tratamento testemunha (dose zero de agregado). Aos 260 dias, os teores de Si no solo nos tratamentos que receberam 100, 200 e 400 kg ha⁻¹ Si eram 2, 8 e 50%, respectivamente, superiores ao da testemunha (Figura 3). Nota-se que, cerca de nove meses após sua aplicação, o agregado continuava a fornecer Si para o solo, embora em menores proporções nas doses de 100 e 200 kg ha⁻¹ de Si aplicado. (Figura 3).

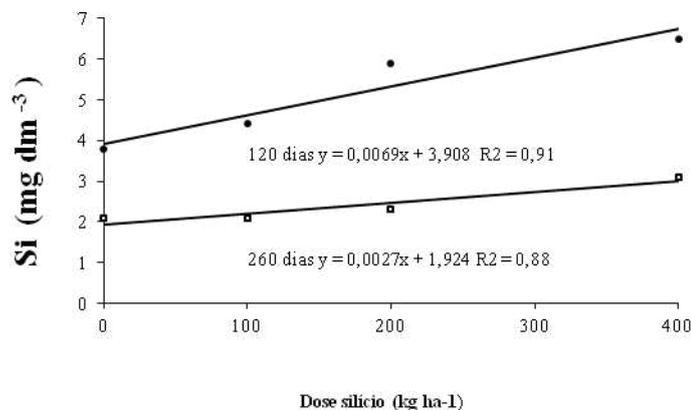


Figura 3. Teor de Si no solo aos 120 e 260 dias após a aplicação de doses crescentes de Si. Cada símbolo representa o valor médio de 8 repetições para cada dose.

O aumento dos teores de Si no solo foi conseqüência da aplicação de doses de agregado (Tabela 1). A disponibilidade de Si no solo aumentou linearmente, porém com pequenos incrementos, com o aumento das doses de agregado, tendo partido de 0,42 g por vaso, na testemunha, para 0,63 g por vaso, com o fornecimento de 400 kg ha⁻¹ de Si. Conseqüentemente houve acréscimo na quantidade de Si acumulado na planta, conforme se elevaram as doses de agregado aplicada (Tabela 2).

Tabela 1. Teor de Si disponível no solo, Si acumulado na parte aérea da cana, Si absorvido proveniente do fertilizante e Índice de Recuperação, em função das doses de Si aplicadas (média das duas variedades)

Si aplicado	Si “disponível” no solo	Si acumulado na parte aérea	Si absorvido proveniente do fertilizante*	Índice de Recuperação**	Média
----- g vaso ⁻¹ -----			----- % -----		
0	0,42	12,31	-	-	
5	0,43	15,14	2,83	56,6	
10	0,45	15,89	3,58	35,8	39,4
20	0,63	17,46	5,15	25,8	

* Si absorvido proveniente do fertilizante = Si acumulado na parte aérea – Si acumulado pela testemunha;

**Índice de Recuperação (%) = (Si absorvido proveniente do fertilizante/Si aplicado) x 100

Tabela 2. Si acumulado (g vaso⁻¹) e teor de Si (g kg⁻¹) foliar nos ponteiros (palmito+folhas) da planta em duas variedades de cana-de-açúcar em função de doses de Si aplicadas no solo.

Dose de Si kg ha ⁻¹	Variedade		Teor de Si	
	SP81-3250	RB86-7515	SP81-3250	RB86-7515
	Si acumulado			
0	2,49 a	1,20 b	3,2 a	3,3 a
100	2,59 a	1,30 b	3,4 a	3,3 a
200	2,28 a	1,57 b	3,6 a	3,5 a
400	2,75 a	1,47 b	3,7 a	3,7 a
Média	2,53 a	1,39 b	3,5 a	3,5 a
	CV: 20,5%		CV: 10,0%	
	DMS (variedade): 0,59		DMS (variedade): 0,5	
	DMS (media): 0,29		DMS (media): 0,3	

Médias seguidas de letras iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05.

Ao se compararem os dados das análises realizadas aos 120 e 260 dias após a aplicação do agregado, verificou-se redução expressiva nos teores de Si no solo (Figura 3). Essa diferença pode ser explicada em parte pela extração do Si pela cana-de-açúcar (Tabela 1). Os teores de Si nas plantas aumentaram de 12,31 para 17,46 g por vaso quando a dose de Si aplicada foi de 400 kg ha⁻¹, o que corresponde a um aumento de aproximadamente 70% na quantidade de Si extraído pela parte aérea da cana (Tabela 1).

A recuperação média do silicato pelas duas variedades de cana-de-açúcar foi de 39,4%, tendo variado de 25,8 a 56,6%, dependendo da dose aplicada (Tabela 1). Considerando-se o fato de que o solo estudado apresentava baixos teores de argila e matéria

orgânica e baixa capacidade de retenção de água, a interação das partículas do silicato com a fase sólida do solo foi menor, explicando, portanto, a baixa reatividade do silicato aplicado. Esse resultado está de acordo com aqueles reportados por Korndorfer et al. (1999), os quais, estudando o efeito do silicato de cálcio como fonte de Si para a cultura do arroz de sequeiro, em quatro solos representativos da região do cerrado, verificaram maior recuperação desse elemento em solos com maiores teores de argila.

A variedade de cana SP81-3250 foi a que apresentou maior capacidade de recuperação de Si (Índice de Recuperação de 55,8%), isto é, do total de Si absorvido mais da metade foi proveniente do fertilizante. A diferença entre as quantidades de Si recuperado pelas duas variedades foi da ordem de 60%, o que demonstra com clareza a maior capacidade da variedade SP81-3250 extrair esse elemento do solo, quando comparada a variedade RB86-7515, sob as mesmas condições de cultivo (Figura 4).

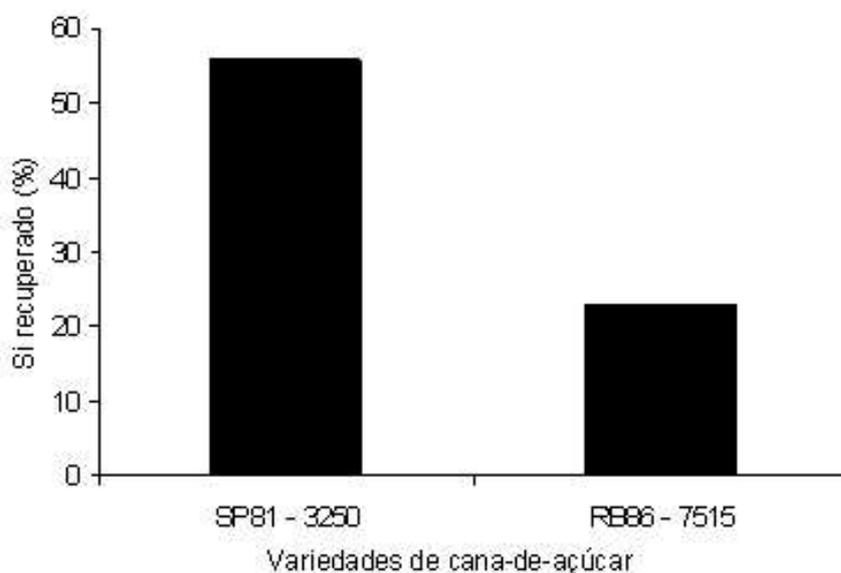


Figura 4. Silício recuperado pelas duas variedades de cana-de-açúcar. Cada símbolo representa o valor médio de 16 repetições para cada variedade.

4.2 Análise de Si foliar

De maneira geral, a variedade SP81-3250 mostrou-se superior em relação a RB86-7515, quanto à capacidade de acumular Si nos ponteiros (palmito+folhas), folhas abaixo dos

ponteiros e colmos, o que resultou em maior acúmulo desse elemento na parte aérea total da planta (Tabela 2). Os teores médios de Si acumulados nos ponteiros (palmito+folhas), folhas abaixo dos ponteiros, colmos e parte aérea total da variedade SP81-3250 foi de 80%, 29%, 23% e 24% superior respectivamente, a acumulada pela variedade RB86-7515 (Tabela 2).

Os teores médios de Si acumulados nas folhas, no colmo e, conseqüentemente, nas plantas das duas variedades de cana aumentaram linearmente com as doses de Si aplicadas (Figuras 5a, 5b e 5c). Tal resultado reforça, portanto, a importância do emprego de fontes de Si no solo quando do cultivo dessa cultura, quando se deseja obter os benefícios desse elemento para a mesma, conforme Ma e Takahashi (2002), independentemente da variedade plantada.

O teor de Si nos ponteiros e nas folhas abaixo do ponteiro não diferiu para as duas variedades, entre nenhuma das doses desse elemento aplicadas (Tabela 3). No entanto, as concentrações médias de Si no palmito elevaram-se de 3,3 para 3,7 g kg⁻¹ e nas folhas abaixo do ponteiro de 9,3 g kg⁻¹ para 11,3 g kg⁻¹, na ausência de aplicação de Si e com fornecimento de 400 kg ha⁻¹ desse elemento, respectivamente (Tabela 3). Independentemente da variedade, a concentração de Si nas folhas abaixo do ponteiro e na parte aérea aumentou linearmente com as doses desse elemento (Tabela 4) (Figuras 6a e 6b). Quando se comparou a testemunha com a maior dose de Si (400 kg ha⁻¹), o aumento médio da concentração desse elemento nos ponteiros (palmito+folhas) e nas folhas abaixo do ponteiro foi de 36 e 12%, respectivamente.

(

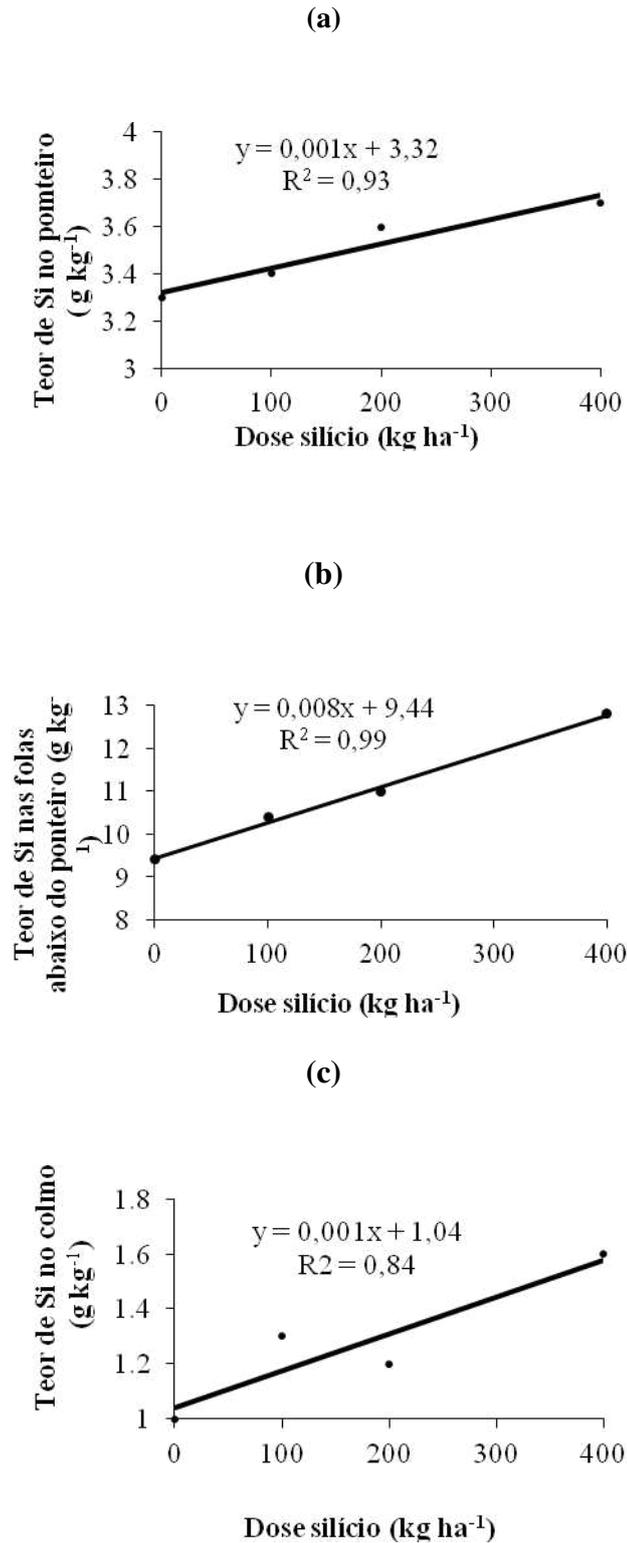


Figura 5. Teores de Si nos ponteiros (palmito+folhas) (a), nas folhas abaixo do ponteiro (b) e nos colmos (c) da cana em função de doses de Si aplicadas no solo (médias das duas variedades).

Tabela 3. Si acumulado (g vaso^{-1}) e teor de Si (g kg^{-1}) em folhas abaixo dos ponteiros da planta em duas variedades de cana-de-açúcar em função de doses de Si aplicadas no solo.

Dose de Si kg ha^{-1}	Variedades			
	SP81-3250	RB86-7515	SP81-3250	RB86-7515
	Si acumulado nas folhas abaixo dos ponteiros		Teor de Si nas folhas abaixo dos ponteiros	
0	8,62 a	7,76 a	9,3 a	9,6 a
100	12,01 a	8,06 b	11,6 a	9,2 a
200	13,00 a	8,90 b	12,2 a	9,8 a
400	11,84 a	11,63 a	12,1 a	13,5 a
Média	11,37 a	9,09 b	11,3 a	10,5 a
	CV: 23,4%		CV: 18,0%	
	DMS (variedade): 3,51		DMS (variedade): 2,9	
	DMS (media): 1,76		DMS (media): 1,4	

Médias seguidas de letras iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05.

Segundo Ma e Takahashi (2002), a deposição de Si, sob a forma de sílica, nas folhas das plantas contribui para melhorar a distribuição do manganês nos tecidos, prevenindo a toxidez por esse elemento; reduz perda de água por transpiração, aliviando estresses hídricos e salinos; contribui para a manutenção das folhas eretas; reduz efeitos adversos causados pelo excesso de nitrogênio, além de aumentar a resistência das plantas a estresses bióticos.

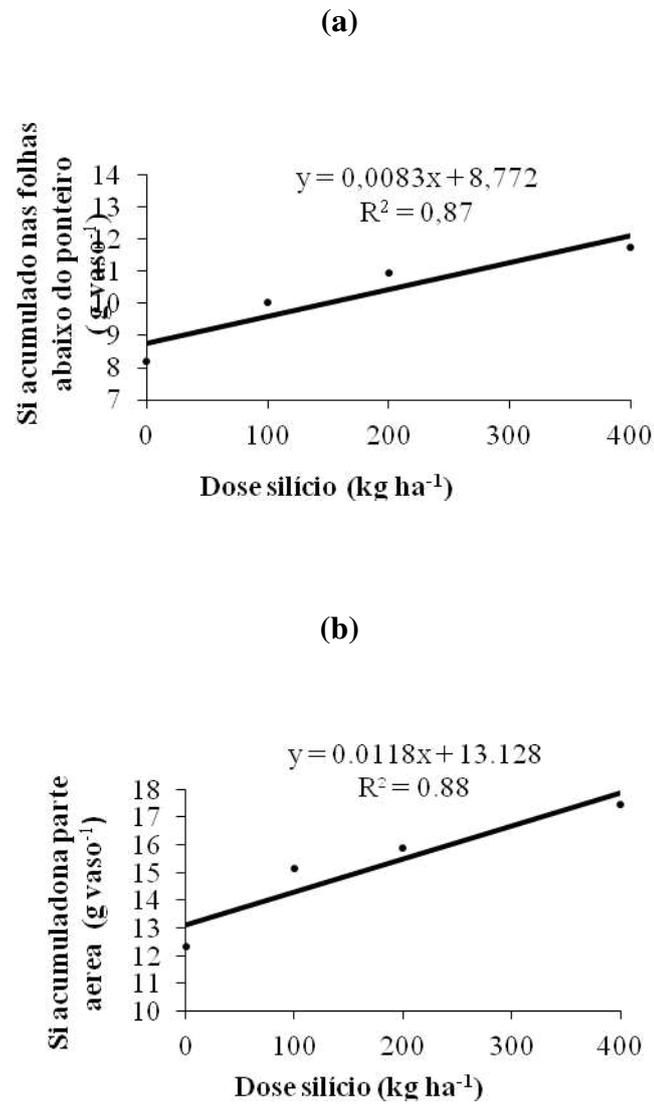


Figura 6. Si acumulado nas folhas abaixo do ponteiro (a) e na parte aérea da plantas (b) de duas variedades de cana-de-açúcar, conforme aplicação de doses crescentes desse elemento no solo (Médias das duas variedades).

Tabela 4. Si acumulado (g vaso⁻¹) na parte aérea total aos 87 dias em duas variedades de cana-de-açúcar em função de doses de Si aplicadas no solo.

Dose kg ha ⁻¹	Variedade	
	SP81-3250	RB86-7515
0	13,65 a	10,97 a
100	18,27 a	12,00 b
200	18,58 a	13,19 b
400	18,75 a	16,17 b
Média	17,31 a	13,08 b

CV: 19,0%
DMS (variedade): 4,24
DMS (media): 2,12

Médias seguidas de letras iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05.

A variedade SP81-3250 apresentou teor de Si nos colmos significativamente superior à variedade RB86-7515 (Tabela 5), em média 14% mais alto. Considerando apenas as duas maiores doses de Si (200 e 400 kg ha⁻¹), a variedade SP81-3250 concentrou, respectivamente, 15 e 22% mais Si nos colmos do que a RB86-7515 (Tabela 5). A deposição de sílica no colmo das plantas promove aumento da resistência das mesmas ao acamamento (MA; TAKAHASHI, 2002). Essa característica é especialmente importante para a colheita da cana crua mecanizada. A seleção de variedades com alto potencial para absorção de Si poderia minimizar os problemas com tombamento na colheita mecanizada.

Além da resistência ao acamamento (MA; TAKAHASHI, 2002), a deposição de Si no colmo da cana-de-açúcar resultou no controle da broca do colmo (KORNDÖRFER et al., 2002). Nesse contexto, fica patente a importância do emprego de fontes de Si no seu cultivo, sobretudo quando esse se dá em solos pobres nesse elemento ou em solos onde o Si não está disponível.

Tabela 5. Si acumulado (g vaso⁻¹) e teor de Si (g kg⁻¹) em colmos de duas variedades de cana-de-açúcar em função de doses de Si aplicadas no solo.

Dose de Si kg ha ⁻¹	Variedade			
	SP81-3250	RB86-7515	SP81-3250	RB86-7515
	Si acumulado nos colmos		Teor de Si nos colmos	
0	2,54 a	2,02 a	1,0 a	1,0 a
100	3,67 a	2,64 b	1,3 a	1,2 a
200	3,31 a	2,73 a	1,3 a	1,1 b
400	4,17 a	3,07 b	1,8 a	1,4 b
Média	3,42 a	2,62 b	1,4 a	1,2 b
	CV: 19,5%		CV: 9,7%	
	DMS (variedade): 0,86		DMS (variedade): 0,2	
	DMS (media): 0,46		DMS (media): 0,09	

Médias seguidas de letras iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05.

O teor médio de Si no colmo das duas cultivares de cana aumentou linearmente com as doses de Si aplicadas (Figura 7). As plantas cultivadas na presença de 400 kg ha⁻¹ Si apresentaram 60% mais Si no colmo do que aquelas mantidas na ausência de aplicação desse elemento. Tal resultado demonstra que a cana-de-açúcar realmente responde a aplicação de doses de Si no solo.

(c)

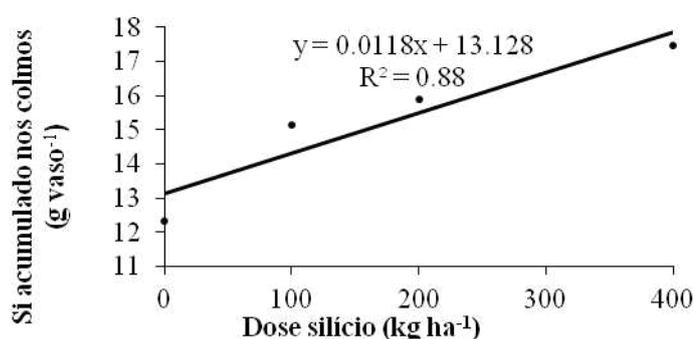


Figura 7. Si acumulado nos colmos de duas variedades de cana-de-açúcar, conforme aplicação de doses crescentes desse elemento no solo (Médias das duas variedades)

5 CONCLUSÕES

1. Os teores de Si disponível no solo e silício foliar em cana-de-açúcar sofreram incremento decorrente da sua aplicação proveniente de agregado siderúrgico (silicato);
2. Grande parte do Si absorvido pela parte aérea da cana foi proveniente do fertilizante aplicado, sendo que a variedade de cana SP81-3250 aproveitou melhor o Si proveniente do silicato se comparado com a variedade RB86-7515;
3. Diante disso, visando os resultados obtidos o uso da variedade de cana-de-açúcar SP81-3250 obteve maior produtividade, sabendo-se que a menor transpiração da planta, melhoria na arquitetura das folhas, e com isso maior interceptação de luz de melhor qualidade, maior taxa fotossintética, atributos influenciados pela aplicação de Si;
4. A rigidez do colmo diminui o acamamento da planta, e com isso, beneficia a colheita da cana-de-açúcar, influenciando também em maior produtividade, decorrente da aplicação de Si no solo, com base nisso, a recomendação de variedade SP81-3250 que apresentou melhores resultados.

REFERÊNCIAS

- ADATIA, M.H.; BESFORD, A.T. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. **Annals of Botany**, London, v. 58, n. 3, p. 343-351, Sept. 1986.
- ALCARDE, J.C. Características de qualidade dos corretivos de acidez do solo. In: RAIJ, B. van. (Ed.) **Acidez e calagem no Brasil**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 1983. 361 p.
- ALCARDE, J.C. **Corretivos de acidez dos solos, características de qualidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 357 p.
- ALVAREZ, J.; DATNOFF, L. E. The economics of silicon for integrated management and sustainable production of rice and sugarcane. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDORFER, G. H. (ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. p. 209-219.
- BALASTRA, M.L.F.C.; PEREZ, C.M.; JULIANO, B.O.; VILLREAL, P. Effects of sílica level on some properties of *Oriza sativa* Straw and Hull. **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 67, n. 8, p. 2356-2363. 1989.
- BIDWELL, R.G.S. **Plant physiology**. New York: Macmillan. 1974. 643 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Balanco nacional da cana-de-açúcar e agroenergia**. Brasília: MAPA. 2007. 140 p.
- DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDORFER, G.H. **Silicon on Agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science. 2001. 403 p.
- DAYANANDAM, P.; KAUFMAN, P.B.; FRAKIN, C.I.: Detection of silica in plants. **American Journal of Botany**, Columbus, v. 70, p. 1079-1084. 1983.
- DRESS, J.L.; WILDING, L.P.; SMECK, N.E. Silica in soils: quartz and disordered silica polymorphs. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (ed.) **Mineral in soil environments** 2.ed. Madison: Soil Science Society of American, 1989. p. 913-974.
- EPAMIG. **O silício na nutrição e defesa de plantas**. 2007. 10 p. (Boletim técnico, 82)
- EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, DC, v.91, n.1, p.11-17, 1994.
- EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v.50, p. 641-664, 1999.
- FARIA, R. **Efeito da acumulação de silício e a tolerância das plantas de arroz do sequeiro ao déficit hídrico do solo**. 2000. 125 f. Dissertação (Mestrado em Solos). Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2000.
- FASSBENDER, H.W. **Química Del y suelos com enfasis em suelos de America Latina**. 2.ed. San Jose: IICA, 1987. 420 p.

- FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: ESAL/FAEPE, 1994. 227 p.
- FAWE, A.; ABOU-ZAID, M.; MENZIES, J.G.; BELANGER, R.R. Silicon – mediated accumulation of flavonoid phytoalexins in cucumber. **Phytopatology**. St. Paul, v.88, n.5, p. 396-401, May 1998.
- FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SISVAR (Sistema para análise de variância) para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45. São Carlos, 2000. **Anais...** São Carlos: Universidade de São Carlos, 2000. p. 255-258.
- FOY C. D. Soil Chemical Factors Limiting Plant Root Growth. In: HATFIELD, J.L.; STEWART, B.A. (Ed.). **Advances in Soil Science: Limitation to Plant Root Growth**. v. 19. New York: Springer-Verlag. 1992. p. 97-149.
- FOY, C. D.; CHANEY, R. L.; WHITE, M. C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 29, p. 511-566, 1978.
- HEDLEY, M.J.; HUSSIM, A.; BOLAN, M.S. New approaches to phosphorus fertilization. In: SYMPOSIUM OF PHOSPHORUS REQUIREMENTS FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE IN ASIA AND OCEANIA, 1. Manilla, 1990. **Proceedings...** Los Baños: IRRI, 1990. p. 125-142.
- HINGSTON, F.J.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. I. The role of the proton in determining adsorption envelopes. **Journal of Soil Science**. Oxford, v.23, n.2, p. 177-192, 1972.
- HORIGUCHI, T. Mechanism of manganese toxicity and tolerance of plants IV. Effects of silicon on alleviation of manganese toxicity of rice plants. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 34, p. 65-73, 1988.
- HORST, W.J.; MARSCHNER, H. Effect of silicon on manganese tolerance of bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). **Plant and Soil**, Dordrecht, v.50, n.2, p.287-303, 1978.
- HUBER, D.M. Relationship between mineral nutrition of plants and disease incidence. In: WORKSHOP - RELAÇÃO ENTRE NUTRIÇÃO DE PLANTAS E INCIDÊNCIA DE DOENÇAS, 1. 2002. Piracicaba. **Anais e vídeo...** Piracicaba: Potafos. 2002. CDROM – vídeo 01.
- JAN, M. S. **A cana de açúcar, de etanol e de eletricidade: uma commodity global**. Disponível em: <http://www.unica.com.br/opiniaio/show.asp>. Acesso em: 04/09/2008.
- JONES, L.H.P.; HANDRECK, K.A. Silica in soils, plants and animals. **Advances in Agronomy**, New York, v.19, n.1, p. 107-149, 1967
- JUO, A.S.R.; SANCHEZ, P.A. Soil nutritional aspects with a view to characterize pland rice environment. In: PROGRESS IN UPLAND RICE RESEARCH. 1985. Jakarta. **Anais...** Los Baños: International Rice Research Institute. 1986. p.81-94.

- KHALID, R.A.; SILVA, J.A. Residual effect of calcium silicate em pH phosphorus and aluminium in a tropical profile. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.26, n.1, p.87-98, 1980.
- KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E. Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças da cana-de-açúcar e do arroz. **Informações Agronômicas**, n. 70, p. 1-5, 1995.
- 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 Ciências do Solo**, Campinas, v. 23, p. 101-106, 1999.
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Silicato de cálcio e magnésio na agricultura**. 3ª Ed. Uberlândia: UFU/ICIAG, 2004, 28 p. (Boletim técnico, 1).
- KORNDÖRFER, G. H.; NOLLA, A.; RAMOS, L. A. Available silicon in tropical soils and crop yield. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 3., 2005, Uberlândia. **Anais...**, Uberlândia: UFU/ICIAG, 2005. 152 p.
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Papel do Si na produção de cana-de-açúcar. **STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 21, n. 2, p. 6-9, 2002.
- KORNDÖRFER, G. H.; RAMOS, L.A. Diagnose Foliar em Cana-de-açúcar. PRADO, R.M.; ROZANE, D.E.; VALE, D.W.; CORREIA, M.A.R. ; SOUZA, H.A. (ed.). **Nutrição de plantas: diagnose foliar em grandes culturas**. Jaboticabal: FCAV/CAPES/FUNDUNESP, v. 1. 2008. 301 p.
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 2004. 34 p. (Boletim técnico, 2).
- LEITE, P.C. **Interação Silício-Fósforo em latossolo roxo cultivado com sorgo em casa de vegetação**. 1997. 87 f. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1997.
- MA, J.F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan**. Amsterdam: Elsevier Science, 2002, 281 p.
- MA, J.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth and phosphorus uptake of Rice. **Plant and Soil**, The Hague, v. 126, p. 115-119, 1990a.
- MA, J.; TAKAHASHI, E. The effect of silicic acid in a P-deficient soil. **Plant and Soil**, The Hague, v.126, p.121-125, 1990b.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba : Agronomica Ceres, 1980. 251 p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1986. 674 p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1995. 889 p.

- McKEAGUE, J.A.; CLINE, M.G. Silica in soil solution. II The adsorption of monosilic acid by soil by other substances. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 43, p. 83-95, 1963.
- MENGEL, K; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 4.ed. Bern: International Potash Institute, 1987. 687 p.
- MIYAKE, Y; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth of soybean plants in a solution culture. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.31, p. 625-636, 1985.
- NWUGO, C.C.; HUERTA, A.J. Effects of silicon nutrition on cadmium uptake, growth and photosynthesis of rice plants exposed to low-level cadmium. **Plant and Soil**, The Hague, v.311, p. 73-86. 2008.
- OLIVEIRA, L.A.; CASTRO N.M. Ocorrência de sílica nas folhas de *Curatella Americana* L. e de *Davilla elliptica* St. Hil. **Revista Horizonte Científico**, Uberlândia, v. 4, p. 1-16. 2002.
- PEREIRA, H.S.; KONDÖRFER, G.H.; VIDAL, A.A.; CAMARGO, M.S. Fontes de silício para a cultura do arroz. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.16, p. 522-528, 2004.
- PIAU, W.C. **Efeito de escórias de siderurgia em atributos químicos de solos e na cultura do milho** (*Zea mays* L.). 1995. 124 f. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.
- PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. **Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil: estudo na cultura da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 67 p.
- PRADO, R.M.; FERNANDES, F. M. Resposta da cana-de-açúcar a aplicação da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.199-207, 2001.
- PRADO, R. M. **Resposta da cana-de-açúcar à aplicação de escória silicatada como corretivo de acidez do solo**. 2000. 79 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Sistemas de Produção) Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2000.
- RAFI, M.N.; EPSTEIN, E. Silicon absorption by wheat (*Triticum aestivum* L.) **Plant and Soil**, The Hague, v. 211, p. 223-230, 1999.
- RAIJ, B. Van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres & Potafos, 1991. 343 p.
- QUAGGIO, J.A. Reação do solo e seu controle. In: SIMPÓSIO AVANÇADO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, 1, 1986, Piracicaba. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1986. p. 53-89.
- RAVEN, J.A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Review**, New York, v.58, n.2, p. 179-207, 1983.

RODRIGUES, F.A. de. **Fertilização silicatada na severidade da queima-das-bainhas (*Rhizoctonia solani* Kuhn) do arroz.** 2000. 100 f. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2000.

RODRIGUES, F.A; McNALLY, D.J; DATNOFF, L.E; JONES, J.B; LABBE, C.; BENHAMOU, N.; MENZIES, J.G.; BELANGER, R.R. Silicon Enhances the Accumulation of Diterpenoid Phytoalexins in Rice: A potential Mechanism for Blast Resistance. **Phytopathology**, Saint Paul, v.94, p. 177-183. 2004.

SAVANT, N.K.; SNYDER, G.D.; DATNOFF, L.E. Silicon in management and sustainable rice production, **Advances in Agronomy**, London, v.58, p. 151-199, 1997.

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

SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E.; REIN, T.A. Adubação com fósforo. In: SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação.** Planaltina: EMBRAPA (EMBRAPA Cerrados), 2002. p. 147-167.

ZUCCARINI, P. Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* under NaCl stress. **Biologia Plantarum**, Praga, v. 52, p. 157-160. 2008.

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