

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DOS DANOS CAUSADOS PELA DEFICIÊNCIA
MODERADA DE FERRO EM CANA-ENERGIA**

CAIO SOARES DE ANDRADE

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DOS DANOS CAUSADOS PELA DEFICIÊNCIA
MODERADA DE FERRO EM CANA-ENERGIA**

CAIO SOARES DE ANDRADE

Orientador: Dr. Renato de Mello Prado

Coorientadores: MSc. Gelza Carliane Marques Teixeira

Dr. Antonio Márcio Souza Rocha

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

A553s Andrade, Caio Soares de
 Silício na mitigação dos danos causados pela deficiência moderada de ferro em
cana-energia / Caio Soares de Andrade. -- Jaboticabal, 2021
 33 p.

 Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) -
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias,
Jaboticabal
 Orientador: Renato de Mello Prado
 Coorientadora: Gelza Carliane Marques Teixeira

 1. Fertirrigação. 2. Estresse nutricional. 3. Aumento da biomassa. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CÂMPUS DE JABOTICABAL



DEPARTAMENTO:

CIÊNCIAS DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA

CERTIFICADO

TRABALHO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

TÍTULO: SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DOS DANOS CAUSADOS PELA DEFICIÊNCIA MODERADA DE FERRO EM CANA-ENERGIA

ACADÊMICO: CAIO SOARES DE ANDRADE

CURSO: ENGENHARIA AGRONÔMICA

ORIENTADOR: PROF. DR. RENATO DE MELLO PRADO

PERÍODO: FEVEREIRO/2020 À FEVEREIRO/2021

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

BANCA EXAMINADORA:

(Nomes)

(Assinaturas)

Presidente Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Membro M.Sc. Jonas Pereira de Souza Júnior

Membro M.Sc. Mariana Bomfim Soares

Jaboticabal 26 / 03 / 2021

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

Chefe do Departamento

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Caio Soares de Andrade, nasceu no município São Sebastião da Gramma, Minas Gerais, em 24 de novembro de 1991, filho de Vera Silvia Soares de Andrade e Antônio Carlos de Andrade. Realizou estágio no laboratório de nutrição de plantas e participou como membro do grupo de estudo em nutrição de plantas das Unesp (GENPLANT) durante o curso de graduação em Engenharia Agrônômica da UNESP, Câmpus de Jaboticabal onde desenvolveu o seu Trabalho de Conclusão de Curso aqui apresentado.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus familiares, amigos e ao corpo docente da UNESP/Jaboticabal pelo apoio fornecido durante toda a sua execução.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Dr. Renato de Mello Prado pela orientação e aprendizado durante o trabalho de conclusão de curso.

Agradeço aos meus coorientadores MSc. Gelza Carliane Marques Teixeira e Dr. Antonio Márcio Souza Rocha pelos ensinamentos e a ajuda na execução do trabalho.

Agradeço também a todos os membros da equipe que me ajudaram de alguma forma, tanto nas análises quanto na escrita deste trabalho.

Por fim, agradeço meus familiares pelo apoio ao longo de todo o curso de graduação.

SUMÁRIO

RESUMO	ii
SUMARY	iii
1. INTRODUÇÃO	4
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 A cana-energia	5
2.2 Importância do ferro (Fe).....	7
2.3 Importância do silício (Si)	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1 Tratamentos e delineamento experimental	11
3.2 Variáveis analisadas	13
3.2.1 Eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm)	13
3.2.2 Conteúdo de clorofilas e carotenoides	14
3.2.3 Índice de extravasamento de eletrólitos	14
3.2.4 Produção de massa seca	14
3.2.5 Determinação do teor de Si	14
3.2.6 Determinação do teor de Fe	15
3.2.7 Eficiência de absorção, translocação e utilização do ferro	15
3.3 Análise estatística.....	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
5. CONCLUSÕES	24
6. LITERATURA CITADA.....	25

RESUMO

A cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) atualmente é a espécie mais promissora do setor sucroenergético no Brasil, pois através de sua matéria prima é possível produzir energia elétrica e etanol de segunda geração. Apesar de já ser mais produtiva que cultivares comuns, o setor sucroalcooleiro visa aperfeiçoar ainda mais a sua produção. Existem vários relatos de melhoramento do crescimento e produtividade da cana-energia, um deles é através da adição de silício (Si) na solução de cultivo. O Si pode trazer vários benefícios fisiológicos para o desenvolvimento da planta, em diversas condições de solo e clima, influenciando assim sua produtividade. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos do Si na atenuação do estresse causado pela deficiência moderada de ferro (Fe) em cana-energia, e testar os principais efeitos dos tratamentos com Si e Fe, bem como, suas interações na cana-energia. Para isso, foram utilizadas mudas pré-brotadas de cana-energia da cultivar VX2 (tipo 2). Os tratamentos foram configurados em esquema fatorial de 2 x 2, sendo o primeiro fator constituído pela suficiência e deficiência de Fe; e o segundo fator constituído pelo fornecimento de Si: ausência (-Si) e presença (+Si). A solução nutritiva de Fe utilizada na suficiência foi de 368 $\mu\text{mol L}^{-1}$ e da deficiência de 55,2 $\mu\text{mol L}^{-1}$ na forma de Fe-EDDHA. Para o Si, a concentração utilizada foi de 2,5 mmol L^{-1} . As seguintes variáveis foram analisadas: i) Eficiência quântica do fotossistema II (PSII); ii) Conteúdo de clorofilas e carotenoides; iii) Índice relativo de cor verde; iv) Índice de extravasamento de eletrólitos; v) Produção de massa seca; Concentração de Si; vi) Concentração de Fe; vii) Eficiência na absorção, translocação e utilização do ferro. Os resultados mostraram que a cultivar VX2 de cana-energia é sensível à deficiência férrica moderada causada pela diminuição do acúmulo deste nutriente nas plantas. Porém o Si pode ser utilizado como uma estratégia de manejo nutricional. Foi verificada que a solução de 2,5 mmol L^{-1} de Si é uma concentração ideal para cultivo de cana-energia em ambientes deficiente de Fe.

Palavras-chaves: fertirrigação, estresse nutricional, aumento da biomassa.

SUMMARY

Energy cane (*S. spontaneum* L.) it is currently the most promising species in the sugar-energy sector in Brazil, as it is possible to produce electricity and second-generation ethanol through its raw material. Despite being more productive than common cultivars, the sugar and alcohol sector aims to improve its production even further. There are several reports of improvement in the growth and productivity of energy cane, one of them is through the addition of silicon (Si) in the cultivation solution. Si can bring several physiological benefits to plant development, in different soil and climate conditions, thus influencing its productivity. Therefore, the objective of this work was to evaluate the effects of Si in attenuating the stress caused by moderate iron (Fe) deficiency in energy cane, and to test the main effects of treatments with Si and Fe, as well as their interactions in sugarcane. energy. For this, pre-sprouted seedlings of sugarcane of cultivar VX2 (type 2) were used. The treatments were configured in a 2 x 2 factorial scheme, the first factor being constituted by Fe sufficiency and deficiency; and the second factor constituted by the supply of Si: absence (-Si) and presence (+Si). The nutrient solution of Fe used in the sufficiency was 368 $\mu\text{mol L}^{-1}$ and the deficiency was 55.2 $\mu\text{mol L}^{-1}$ in the form of Fe-EDDHA. For Si, the concentration used was 2.5 mmol L^{-1} . The following variables were analyzed: i) Quantum efficiency of photosystem II (PSII); ii) Chlorophyll and carotenoid content; iii) Relative green color index; iv) Electrolyte leakage rate; v) Dry mass production; Concentration of Si; vi) Fe concentration; vii) Efficiency in iron absorption, translocation and utilization. The results showed that the VX2 cane-energy cultivar is sensitive to moderate iron deficiency caused by the decrease in the accumulation of this nutrient in plants. However, Si can be used as a nutritional management strategy. It was verified that the 2.5 mmol L^{-1} Si solution is an ideal concentration for growing sugarcane in Fe-deficient environments.

Keywords: fertigation, nutritional stress, increase in biomass.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma das espécies vegetais produzida em maior quantidade no mundo, considerada a principal fonte para a produção de açúcar. Além disso, a cultura insere-se como uma das mais importantes para a produção de etanol e de bioprodutos (CORDEIRO et al., 2007; ROBERT e KOLE, 2010).

Para atender toda a demanda de açúcar, etanol e bioprodutos, além de utilizar resíduos agrícolas e agroindustriais, denominados de biomassas residuais, tem-se realizado estudos para desenvolver novas cultivares de cana (ROCHA, 2017). A cana-energia (*S. spontaneum* L.), um híbrido de canas comerciais e silvestres, caracteriza-se por ser uma cultura energética ideal para produção de etanol celulósico devido a produção de alto teor de fibras e baixo teor de sacarose (KIM e DAY, 2011).

No entanto, o uso da cana-energia tem se intensificado em áreas com solos mais arenosos e de baixa fertilidade (BERNAL et al., 2017). Assim, apesar da cana-energia possuir maior tolerância ao cultivo em ambientes adversos, a produtividade pode ser diminuída devido à estresses por deficiências nutricionais. Entre essas deficiências nutricionais, as associadas com baixos teores de ferro (Fe) podem comprometer o desenvolvimento da cana-energia por tratar-se de uma espécie com alta demanda por esse nutriente (VILLAR, 2007).

Plantas de cana-energia submetidas à deficiência férrica apresentaram clorose, que pode ter sido agravada por um desequilíbrio de íons metálicos, sendo uma das consequências da privação de Fe, podendo também causar um desequilíbrio da homeostase redox celular (MARIN, 2013; NIKOLIC et al., 2019).

Uma das maneiras de se alcançar a sustentabilidade no sistema produtivo de cana-energia é aumentar a sua tolerância à possíveis estresses. Para isso, umas das ferramentas disponíveis é o fornecimento de silício (Si) para as plantas, pois apesar de não ser considerado nutriente de plantas é um elemento benéfico (MIYAKE e TAKAHASHI, 1985). Assim, o aumento da

concentração de Si no tecido foliar pode diminuir os efeitos negativos causado por estresses abióticos, como a deficiência nutricional (SANTOS, 2017).

As plantas acumuladoras de Si, como a cana-energia, apresentam alta taxa de absorção do elemento e por essa razão os efeitos benéficos são mais expressivos nessas espécies (MIYAKE e TAKAHASHI, 1985). O Si ainda pode aumentar os pools de íons metálicos na raiz e nos cloroplastos da folha em condições de suficiência, além de intensificar a reutilização e transporte das plantas na condição de deficiência de Fe (HERNANDEZ-APAOLAZA, 2014; LIU et al., 2015; NIKOLIC et al., 2019). Os benefícios do Si também foi encontrado no trabalho de Teixeira et al. (2020), onde adicionado na cultura de sorgo (*Sorghum bicolor* L.), atenuou os sintomas causados pela deficiência de ferro. Foi observada a diminuição da peroxidação lipídica, aumentando o teor de clorofila e a eficiência nutricional, principalmente a translocação e eficiência de uso do ferro, resultando em maior acúmulo de peso seco.

Dessa forma, visto o grande potencial da cana-energia e todos os elementos que possam potencializar o seu setor como visto no trabalho de Teixeira et al. (2020) onde o potencial hídrico foliar foi aumentado, resultando assim em um maior crescimento e produção de biomassa da planta, tornando o plantio altamente produtivo. Portanto, fazem-se necessárias pesquisas que aperfeiçoem novas técnicas agrônômicas com enfoque no setor sucroenergético. Com isso o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos do Si na atenuação dos estresses causados pela deficiência moderada de Fe em um cultivar de cana-energia e testar os principais efeitos dos tratamentos com Si e Fe, bem como suas interações na cultivar de VX2.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cana-energia

As plantas do gênero *Saccharum* correspondem as espécies vegetais mais versáteis dentre as culturas manejadas pelo homem, pois, além de possibilitar uma gama de formas e produtos para sua utilização, ainda se adaptam bem às diversas condições edafoclimáticas, seja pela sua adaptação

natural ou através da manipulação em programas de melhoramento genético (OKUNO, 2019).

Na região tropical a produção de cana-de-açúcar tem crescido não só pela produção de açúcar, mas também como fonte de energia renovável, sendo frequente a pesquisas com espécies de *Saccharum spp.* com maior potencial de geração de energia, etanol e eletricidade, levando a seleção a espécie denominada de cana-energia (*S. spontaneum* L.) (SARMENTO, 2019).

No Brasil o desenvolvimento da cana-energia começou a ser explorado na década de 1980. Nos últimos anos a planta se destacou no mercado de bioeletricidade e das usinas, abrindo-se um campo para novos investimentos em cogeração de energia, e criando-se condições para o desenvolvimento de matérias-primas ricas em biomassa (MARIANO et al., 2013).

A cana-energia é resultante da produção de híbridos da espécie *Saccharum spp.*, possuindo assim grande quantidade de biomassa (celulose e hemicelulose) (MATSUOKA et al., 2014). As variedades de cana-energia tiveram seus cruzamentos realizados para se obter um melhor aproveitamento das características da *S. spontaneum* L., espécie com alto teor de fibra, visando à alta produtividade de massa seca (MARIANO, 2013; OKUNO, 2016, CAVERSAN, 2017).

As variedades de cana-de-açúcar mais utilizadas são resultantes de uma série de cruzamentos, que buscam se assemelhar à espécie *S. officinarum* L., escolhida para a produção de açúcar, por possuir elevado teor de açúcar e baixa quantidade de fibra (MARIANO, 2015). Mas a cana-energia se diferencia pela maior densidade de fibras, menor espessura, maior taxa de crescimento, maior resistência à seca e maior número de cortes das soqueiras (OKUNO, 2016). A cana-de-açúcar, por exemplo, suporta cerca de 5-8 cortes entre os períodos de renovação da planta até o fim da vida útil. Já a cana-energia atinge até 15 cortes, com longevidade muito superior à da cana-de-açúcar, sendo esta uma importante característica comercial (HERNÁNDEZ et al., 2019).

Mariano (2015), já destacava a necessidade do mercado da produção de energia comandado pelas usinas que necessitam do uso de matérias-primas

ricas em biomassa para aumentar a sua produtividade. Milhões de reais são investidos anualmente no Brasil para o desenvolvimento de novas matérias-primas visando altas produtividades e viabilidade econômica no setor energético.

Os programas de melhoramento genético da espécie *Saccharum spp.* são as instituições públicas IAC, RIDESA e CTC e as instituições privadas Sygenta, Vignis, GranBio. Ressalta-se que as instituições privadas Vignis e GranBio conduzem programas específicos para o melhoramento da cana-energia (OKUNO, 2016).

Dessa forma, as áreas de cultivo de cana-energia têm se expandido devido ao seu elevado potencial para a produção de massa seca, que é composta por fibra e sólidos solúveis, sendo destinada a produção de energia e etanol de primeira e segunda geração (CAVERSAN, 2017). Associado a isso, a cana-energia também apresenta vantagem pela maior adaptabilidade, que permite ser plantada em áreas com baixa aptidão agrícola, tendo o seu sistema radicular mais profundo para captação de água e nutrientes. Sua rusticidade permite que a planta exija menos água e menos insumos para crescer. Tudo isso, aliado a uma alta produtividade, faz da cana-energia uma das matérias-primas mais competitivas atualmente (PEDROSO et al., 2011).

No entanto, o cultivo em áreas marginais e em solos de baixa fertilidade podem expor a cana-energia a desordens nutricionais, como as causadas pela deficiência de ferro (Fe).

2.2 Importância do ferro (Fe)

O ferro (Fe) é um micronutriente para as plantas, sendo responsável por processos importantes como a transferência de elétrons que utilizam o Fe como cofator de escolha, formando complexos mais estáveis com certos metais, sendo importantes metaloproteínas para reações de transferência de elétrons (OLIVEIRA et al., 2015). O Fe ainda é responsável por constituir enzimas envolvidas em uma variedade de reações-redox reversíveis (FOURCROY et al., 2014), participa na rota da síntese de clorofila (ABADÍA

VENTURA et al., 2018), na fotossíntese (LIU et al., 2015), bem como, na síntese de DNA e respiração (BRIAT et al., 2015).

Em condições normais de aeração, o Fe está presente nos solos sob a forma de óxidos e hidróxidos de Fe^{3+} de baixíssima solubilidade (TEIXEIRA et al., 2020). A baixa disponibilidade desse nutriente é acentuada em solos com pH próximo da neutralidade ou alcalino (JIANG et al., 2016). No entanto, qualquer fator que cause redução da solubilidade do Fe para níveis abaixo do limite tolerado pelas plantas, ou exerça efeitos de competição que limitem a absorção desse nutriente, contribui para a sua deficiência (DELÚ-FILHO et al., 1994).

Quando a distribuição do Fe é uniforme, os óxidos de ferro conferem aos solos cores típicas avermelhadas como ocorre, por exemplo, nos Latossolos, devido a presença de hematita (KAMPF, 1988). Os solos com altas concentrações de Fe geralmente não provocam malefícios às plantas, pois a maior parte desse nutriente encontra-se numa forma pouco disponível no solo (GUERINOT e YI, 1994; JUCOSKI et al., 2016).

A absorção do Fe está relacionada com a capacidade das raízes em reduzi-lo de forma férrica (Fe^{3+}) para a ferrosa (Fe^{2+}). O mecanismo de absorção do Fe pelas plantas é controlado por fatores genéticos (BROWN, 1978). A capacidade das raízes em reduzir Fe^{3+} para Fe^{2+} parece ser fundamental na absorção deste cátion por muitas plantas. De acordo com Romheld e Marschner (1983) o Fe^{3+} quelatizado é reduzido muito mais rapidamente do que o FeCl_3 . A velocidade de redução do Fe depende do pH e é maior em pH baixo (CHANEY et al., 1972). O Fe não é facilmente transportado nos tecidos e por isso deficiências ocorrem nas partes novas das plantas (PRADO, 2020).

Embora não faça parte das moléculas de clorofila, o Fe é essencial para a sua síntese, porque é precursor da Fe_2O_3 (TRONC et al., 1998). Dessa forma, plantas sob deficiência de Fe, apresentam baixo teor de clorofila e o número de cloroplastos também diminuem (SANTOS-FILHO, 1988). Sob carência de Fe, surgem inicialmente estrias amareladas na base das folhas

novas; com o passar do tempo, o estriamento das folhas avança para as folhas de idade intermediária e mais velhas. As folhas tornam-se mais eretas e persistindo a deficiência começa o amarelecimento generalizado de todas as folhas. As cloroses evoluem para necroses e as folhas necrosadas apresentam textura aveludada, diferente dos tecidos necrosados por deficiência de outros nutrientes (SOUZA, 2018).

A deficiência de Fe ainda pode tornar o enraizamento mais superficial num período em que os perfilhos estão sendo nutridos por reservas do colmo das mudas ou pelas raízes das soqueiras. Nesta fase, a cana-de-açúcar apresenta clorose internerval, formando estrias paralelas longitudinais em toda a extensão da folha. Em casos mais severos, as folhas tornam-se brancas e ficam com as pontas ressecadas (GODOY et al., 2016). Outros sintomas ocorrem em reboleiras, em solos arenosos e de baixa fertilidade, e tendem a desaparecer após seis meses de crescimento da planta. As folhas afetadas apresentam clorose internerval que se alastram por toda a extensão da lâmina foliar e atingem até nervura central (MOURA e OLIVEIRA, 2009).

2.3 Importância do silício (Si)

O silício (Si) é o segundo elemento químico mais abundante da crosta terrestre, representando 27,7%, superado apenas pelo oxigênio. É encontrado na natureza na forma de óxidos (SiO_4), fazendo parte de rochas, areia e argila (DECHEN e NACHTIGALL, 2007). O Si é considerado um elemento químico benéfico para as plantas terrestres e essencial para as equisetáceas (pteridófitas, equisetíneas e isospóricas) e algumas algas (diatomáceas) (EPSTEIN, 1999).

A cana-de-açúcar absorve o Si na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) juntamente com a água por fluxo de massa ou pela ação de transportadores (absorção ativa) (MA et al., 2001). Após absorvido, o Si se acumula principalmente nas áreas de máxima transpiração (tricomas, espinhos, etc.) como ácido silícico polimerizado (sílica amorfa) (MA et al., 2001). As plantas

com teor foliar acima de 1%, como a cana-de-açúcar, são consideradas acumuladoras de Si (MARAFAON, 2020).

Assim, por tratar-se de uma planta acumuladora de Si, existem trabalhos que demonstram efeito benéfico desse elemento em plantas de cana-de-açúcar submetidas à estresses ambientais, como o déficit hídrico (TEIXEIRA et al., 2020a). Além disso, o Si também pode diminuir desordens nutricionais, aumentando a redistribuição do nutriente faltante, como relatado em plantas deficientes em ferro (Fe) (BITYUTSKII et al., 2014), além de proporcionar maior eficiência de Fe (TEIXEIRA et al., 2020b) e manganês (Mn) (OLIVEIRA et al., 2019). Portanto, o Si é visto como um elemento valioso e importante para as estratégias de manejo que visam diminuir as perdas em plantas sob estresse nutricional (VASANTHI et al., 2014).

O Si que comumente é fornecido às culturas é proveniente da siderurgia, que é uma fonte de Si abundante no Brasil, sendo constituída basicamente por silicato de cálcio e magnésio e termofosfatos magnesiano (FREITAS et al., 2011). No entanto, deve-se atentar a qualidade desse material que podem apresentar concentração de metais pesados, além de apresentar baixa solubilidade em água (KORNDÖRFER; DATNOFF; CORREA, 1999; BUCHELT, 2019).

Desse modo, estudos mais recentes têm demonstrado resultados positivos com o uso de fontes solúveis, como o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol (TEIXEIRA et al., 2020a; SANTOS et al., 2020). O sorbitol é um poliálcool que proporciona maior estabilidade na solução, retardando a taxa de polimerização do elemento na superfície foliar (KUBICKI e HEANEY, 2003), e com diminuição do valor pH, pode induzir aumento das espécies monoméricas de Si (ácido silícico) (SANTOS, 2018), facilitando a sua absorção pela planta e diminuindo o gasto de energia (CRUSCIOL et al., 2013).

Dessa forma, acredita-se que o fornecimento de Si através de uma fonte solúvel pode mitigar os danos causados pela deficiência de Fe em plantas de cana-energia.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação na Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus de Jaboticabal, no período de janeiro a julho de 2019. Os dados de temperatura e umidade relativa dentro da casa de vegetação foram registrados diariamente com o auxílio de um termo-higrômetro (Figura 1).

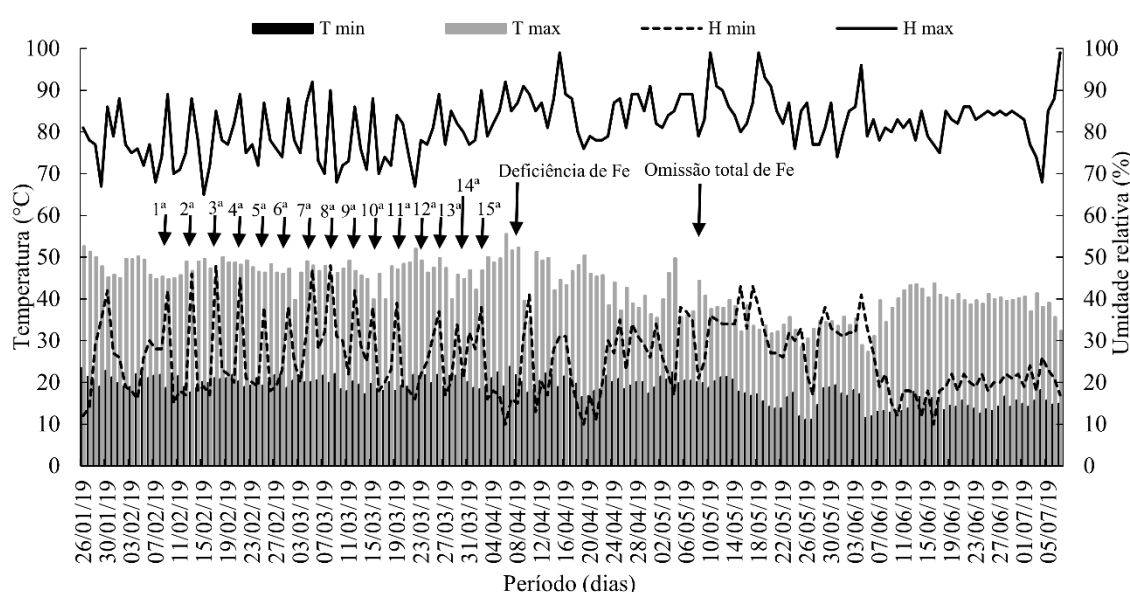


Figura 1. Temperatura máxima e mínima (T max e T min) do ar e umidade relativa (H max e H min) dentro da estufa durante todo o período experimental. As setas indicam as datas de fornecimento de silício, a imposição de deficiência de ferro (Fe) e a omissão total de Fe na solução nutritiva.

Foi utilizado mudas pré-brotadas (MPB) de cana-energia (*S. spontaneum* L.). A cultivar VX2 (tipo 2) foi selecionada devido ao grande uso nas áreas de cultivo, apresentando características agrônômicas de elevada produção de fibra em detrimento da produção de sacarose (BRESSIANI, 2001).

Inicialmente, foi realizado o plantio dos mini-colmos em bandejas de produção de mudas preenchida com vermiculita fina. A solução nutritiva utilizada foi a de Hoagland e Arnon (1950) com alteração na concentração de Fe para $368 \mu\text{mol L}^{-1}$ na forma de Fe-EDDHA, conforme indicação de

Cavalcante et al. (2019). Para evitar a salinização do substrato, a concentração de sais da solução nutritiva durante a primeira semana de cultivo foi mantida a 25% de diluição e elevada para 50% da segunda semana até o fim do experimento. O volume de solução aplicado foi definido a partir de teste preliminar de saturação do substrato, evitando perda por lixiviação, sendo determinado como ideal a aplicação de 10 mL por muda utilizando uma proveta. O valor pH da solução nutritiva foi ajustado para $5,5 \pm 0,2$ com o uso de solução de ácido clorídrico (HCl) ou hidróxido de sódio (NaOH) ambos a $1,0 \text{ mol L}^{-1}$.

A concentração de Si utilizada foi de $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$ porque o elemento em solução começa a polimerizar a partir dos 3 mmol L^{-1} (BIRCHALL, 1995). A fonte de Si solúvel utilizada foi o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol ($113,4 \text{ g L}^{-1}$ de Si e $18,9 \text{ g L}^{-1}$ de K_2O e pH 11,8). Foram realizadas 15 fertirrigações de Si com intervalos de 4 dias, a partir de 10 dias após a emergência plena dos brotos (DAE) (Figura 1), aplicando 10 mL por muda via substrato e 1,47 mL por muda via pulverização foliar usando um pulverizador manual.

O valor do pH da solução de Si fertirrigada foi ajustado para $5,5 \pm 0,2$, porque a solução em pH ácido favorece aumento de espécies monoméricas de Si aumentando eficiência da absorção (KUDRYAVTSEV e FIGOVSKY, 2016). Foi realizado o equilíbrio da quantidade de potássio presente na fonte de Si nos tratamentos com ausência do elemento, utilizando uma solução de cloreto de potássio a $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ com aplicação via radicular e por pulverização foliar.

Aos 60 DAE, as mudas foram transplantadas para vasos de $7,0 \text{ dm}^3$ preenchidos com $5,5 \text{ dm}^3$ de areia previamente lavada com água, solução de HCl (1%) e água deionizada. No transplântio, as mudas tinham seis folhas completamente desenvolvidas e foi realizado o corte a 30 cm da bainha da última folha completamente desenvolvida, ou seja, próximo de um terço das folhas foram removidas, sendo uma prática comum em viveiros de mudas com o objetivo de diminuir a perda de vapor de água por transpiração no momento do transplântio para solo (LANDELL et al., 2012).

Os tratamentos foram configurados em esquema fatorial de 2 x 2, sendo o primeiro fator constituído pela suficiência e deficiência de Fe; e o segundo fator constituído pelo fornecimento de Si: ausência (-Si) e presença (+Si). O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com seis repetições.

Após o transplântio, as plantas foram submetidas à deficiência nutricional moderada de Fe. Para a condição de suficiência, a concentração de Fe foi mantida em $368 \mu\text{mol L}^{-1}$ (CAVALCANTE et al., 2016). Na deficiência, a concentração de Fe inicialmente foi de $55,2 \mu\text{mol L}^{-1}$, o que corresponde a 61% da concentração recomendada por Hoagland and Arnon (1950). Após 30 dias, o Fe foi totalmente omitido da solução e aplicada uma lâmina de lixiviação suficiente para remover o excesso de sais do substrato. O período de omissão de Fe se estendeu até os 60 DAE, momento de retirada do experimento.

As plantas do tratamento com fornecimento de Si continuaram a receber o elemento durante a fase de deficiência nutricional na mesma concentração e fonte da fase de formação das mudas. O valor do pH da solução nutritiva foi diariamente ajustado antes da aplicação nos vasos. O fornecimento da solução nutritiva foi constante, mantendo a umidade do substrato. Os substratos foram frequentemente lavadas com água deionizada para evitar o acúmulo de sais.

3.2 Variáveis analisadas

3.2.1 Eficiência quântica do fotossistema II (F_v/F_m)

As medições fotossintéticas do rendimento quântico do fotossistema II (F_v/F_m) foram realizadas entre 7h e 8h, as folhas foram submetidas a um período de adaptação ao escuro usando pinças do aparelho e intensidade de saturação de $3500 \mu\text{mol}$ por um período de 30 minutos. As medidas foram realizadas na primeira folha completamente expandida de cada planta e determinado utilizando fluorômetro portátil (Opti-sciences – Os30P) (LICHTENTHALER et al., 2005).

3.2.2 Conteúdo de clorofilas e carotenoides

Cinco discos foliares de 6 mg foram coletados no terço médio da lâmina foliar da folha zero e da quarta folha completamente desenvolvida, conforme metodologia proposta por Lichtenthaler (1987). As leituras foram realizadas em espectrofotômetro (Beckman DU 640) a 663 nm para clorofila a (Cha), 647 nm para clorofila b (Chb) e 470 nm para carotenóides, sendo o conteúdo definido com base na matéria fresca.

3.2.3 Índice de extravazamento de eletrólitos

Foram coletados dez discos foliares da primeira folha completamente desenvolvida e emergidos em água deionizada por 2 horas, sendo a condutividade elétrica (EC1) da solução lida usando um medidor de condutividade (TDS-3). As amostras foram autoclavadas a 121°C por 20 min e após o resfriamento a condutividade elétrica final (EC2) foi obtida. O vazamento de eletrólitos foi determinado considerando a equação proposta por Dionisio-Sese e Tobita (1998): $EC1/EC2 \times 100$.

3.2.4 Produção de massa seca

As plantas foram separadas em folhas velhas, folhas intermediárias, folhas novas, colmo e raízes, depois foram lavadas em água corrente, solução detergente (0,1% v/v), solução de HCl (0,3% v/v) e água deionizada, respectivamente. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar ($65 \pm 5^\circ\text{C}$), até atingir uma massa constante. A massa seca de cada parte da planta foi obtida a partir da pesagem em balança analítica.

3.2.5 Determinação do teor de Si

O teor de Si foi analisado nas folhas velhas, folhas intermediárias, folhas novas, colmo e raízes a partir da extração de acordo com a metodologia descrita por Kraska e Breitenbeck (2010), com leitura realizada por

espectrofotômetro a 410 nm, conforme indicado por Korndörfer et al. (2004). Com base no teor de Si e na matéria seca, foi calculado o acúmulo de Si em cada parte da planta.

3.2.6 Determinação do teor de Fe

Os teores de Fe foram determinados nas folhas velhas, folhas intermediárias, folhas novas, colmo e raízes após a extração, usando o método descrito por Bataglia et al. (1983). O acúmulo de Fe foi calculado de acordo com as suas concentrações e a massa seca de cada parte da planta.

3.2.7 Eficiência de absorção, translocação e utilização do ferro

A eficiência de absorção (a), transporte (b) e utilização (c) de Fe foram calculadas com base no acúmulo desse micronutriente e da massa seca da planta, conforme descrito por Fageria e Baligar (2005).

(a) Eficiência de absorção = (conteúdo total do nutriente na planta)/(matéria seca de raízes)

(b) Eficiência de transporte = ((conteúdo do nutriente na parte aérea)/(conteúdo total do nutriente na planta)) x 100

(c) Eficiência de utilização = (matéria seca total produzida)²/(conteúdo total do nutriente na planta).

3.3 Análise estatística

Os dados foram submetidos a uma análise de variância bidirecional (ANOVA) pelo teste F ($p \leq 0,05$) após verificação da homogeneidade das variâncias (teste W de Shapiro-Wilks). Uma análise fatorial foi utilizada para testar os principais efeitos dos tratamentos com silício (Si) e ferro (Fe), bem como suas interações (Si x Fe). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey, com 5% de probabilidade, usando o software estatístico Agroestat (BARBOSA e MALDONADO JÚNIOR, 2010).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fornecimento de Si na solução nutritiva aumentou a concentração do elemento em todas as partes das plantas de cana-energia na suficiência e na deficiência de Fe. O maior acúmulo do elemento benéfico foi observado no colmo, seguido pelas folhas intermediárias, folhas velhas, raízes e, por fim, folhas novas, respectivamente (Figura 2).

O incremento do acúmulo deste elemento benéfico nas plantas da cana-energia ocorreu de maneira expressiva por tratar-se de uma espécie que pertence à família Poaceae, considerada acumuladora de Si tendo carregadores específicos para a absorção radicular do elemento (MITANI et al., 2009). A ótima absorção do Si pela planta se deve também a qualidade da solução aplicada, com concentração adequada ($2,5 \text{ mmol L}^{-1}$) evitando-se a polimerização que ocorre em concentração de Si acima de $3,0 \text{ mmol L}^{-1}$ (BIRCHALL, 1995) e, devido ao pH ácido da solução utilizada no experimento que favorece aumento de espécies monomérica de Si (H_4SiO_4) (KUDRYAVTSEV e FIGOVSKY, 2016), favorecendo a sua absorção (RAVEN, 1983).

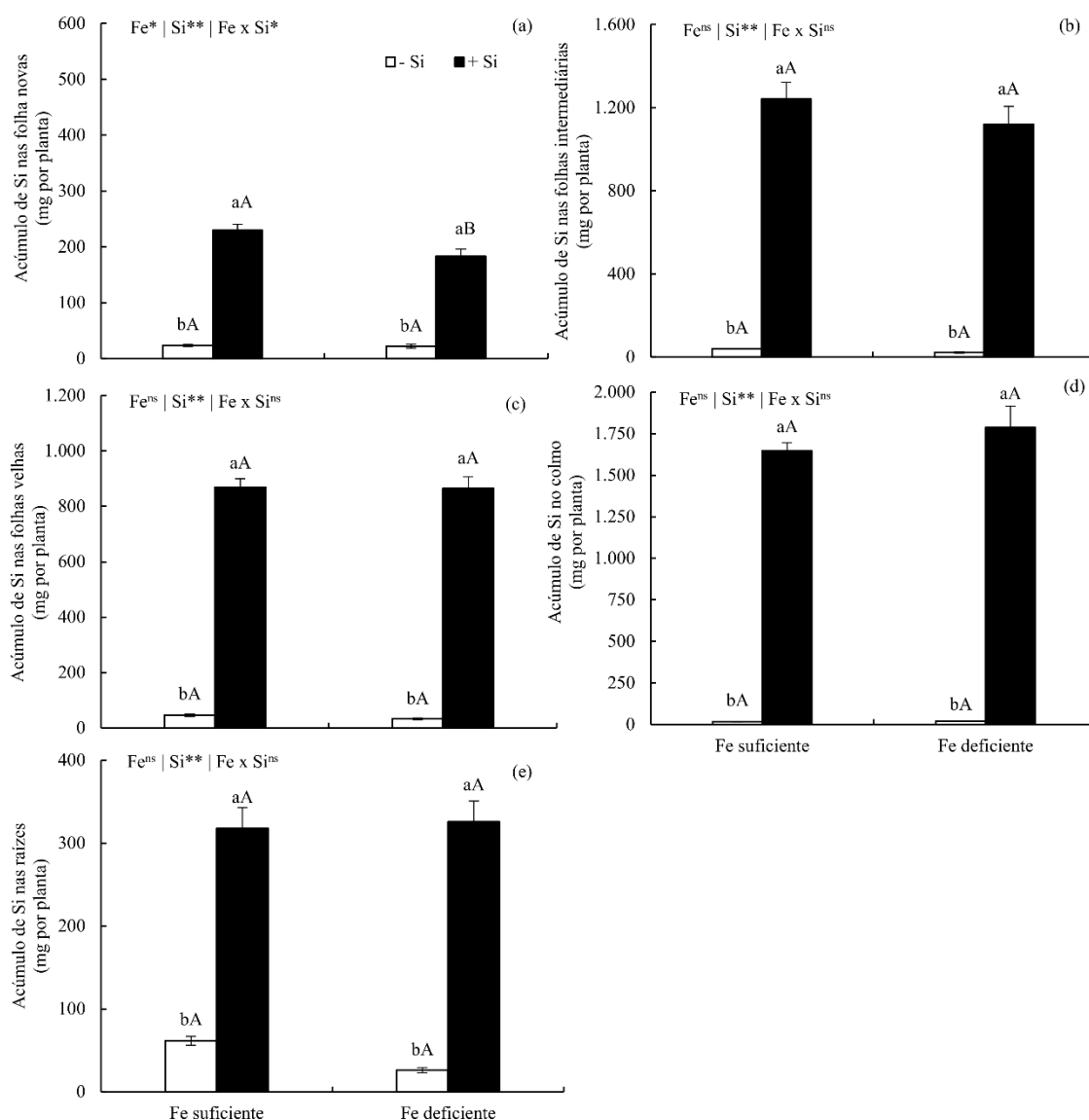


Figura 2. Acúmulo de silício (Si) nas folhas novas (a), folhas intermediárias (b), folhas velhas (c), colmo (d) e raízes (e) na suficiência e deficiência de ferro (Fe), associado à ausência (-Si) e presença (+Si) de Si em plantas de cana-energia da cultivar VX2. **: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente e ^{ns}: não significativo pelo teste-F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si na mesma condição de Fe; e letras maiúsculas em relação ao Fe na mesma condição de Si pelo teste de Tukey. Barras representam o erro padrão da média.

A deficiência moderada de Fe impostas às plantas diminuiu o acúmulo do micronutriente em todas as partes da planta avaliadas, em comparação a condição de suficiência de Fe. No entanto, a adição de Si proporcionou

aumento no acúmulo de Fe nas folhas novas, intermediárias, colmo e raízes das plantas de cana-energia sob deficiência férrica (Fig. 3 a-e).

A ordem de acúmulo de Fe em cada parte das plantas variou em função do fornecimento de Si e pela imposição da deficiência nutricional de maneira, mas em todos os tratamentos a raiz apresentou maior acúmulo de Fe e a folha nova menor acúmulo do micronutriente. A ordem de acúmulo de Fe de acordo com a parte da planta apresentou a seguinte sequência: raiz, folhas velhas, folhas intermediárias, folhas novas e colmo (Fig. 3a-e).

A cana-energia mostrou-se sensível à deficiência férrica moderada, causada pela diminuição do acúmulo deste nutriente nas plantas. Apesar do Fe ser abundante no solo, normalmente muito pouco está disponível para o desenvolvimento da cultura; assim, as deficiências não são raras em muitas regiões destinadas ao cultivo de cana-energia (VILLAR, 2007). O Fe age como catalisador na formação da clorofila e é essencial para a síntese de proteínas e ajuda a formar complexos enzimáticos e na transferência de energia (RODRIGUES e CAMARGO, 2008).

O Fe é um dos principais elementos formadores de superóxido dismutase (SOD), onde catalisam a dismutação do radical superóxido em O_2 e H_2O_2 que são substratos da reação que origina os radicais $OH^\cdot$, representando por isso, o papel central no mecanismo de defesa antioxidante (MATSON, et al., 1998; ALSCHER et al., 1998). O Fe (SOD) é encontrado em quase todos os compartimentos celulares, no ciclo da água nos cloroplastos, nas mitocôndrias, citosol e peroxissomos. O aumento da atividade SOD tem sido observado em várias espécies submetidas a condições estressantes (BIENERT et al., 2007; ULISSES, 2016).

No entanto, ficou evidente que o fornecimento de Si na solução nutritiva promove aumento no acúmulo de Fe nas plantas, diminuindo os danos causados por diversas desordens nutricionais, principalmente em plantas em condições de deficiência de Fe conforme anteriormente indicado por Bityutskii et al. (2014).

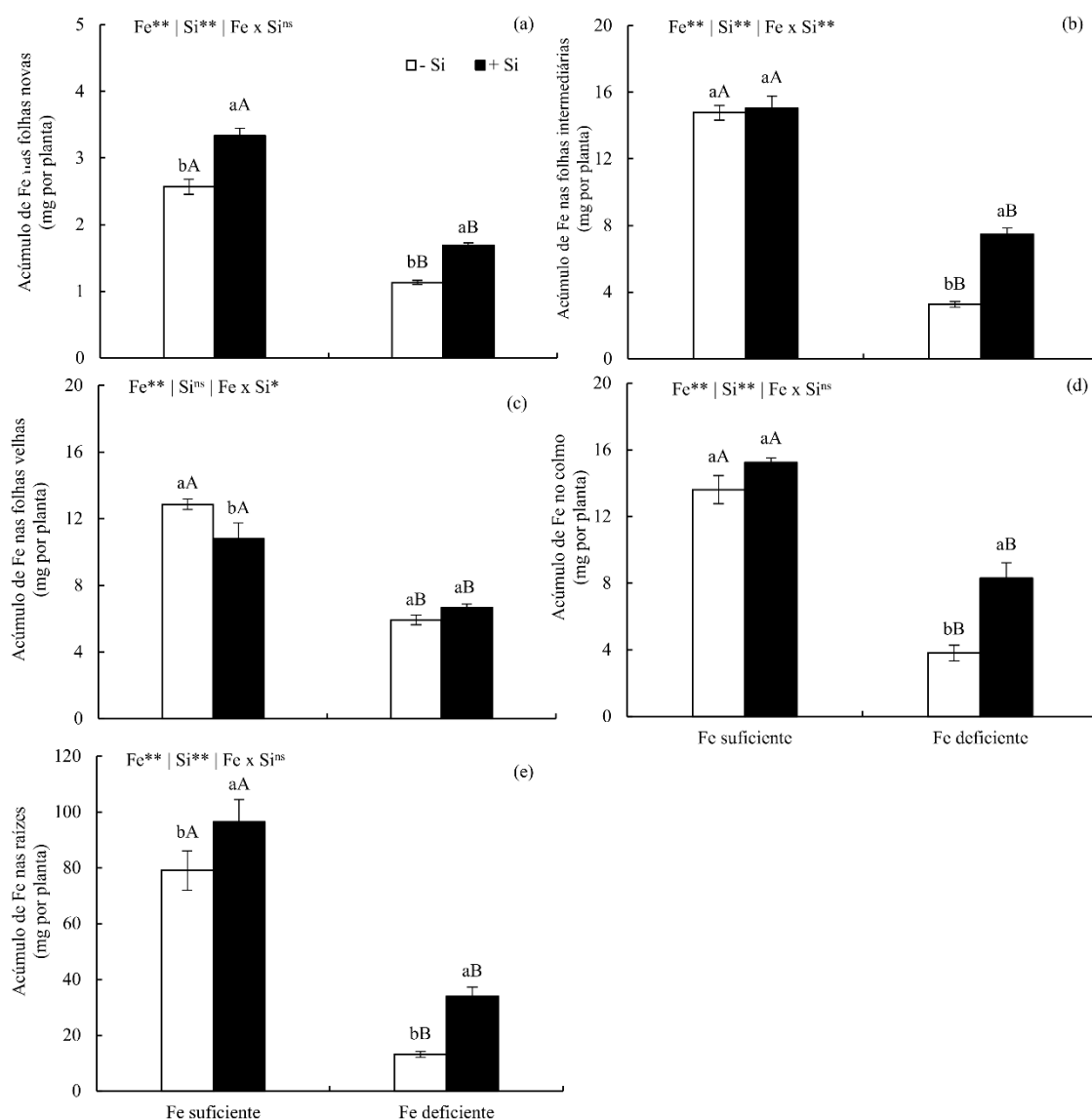


Figura 3. Acúmulo de ferro (Fe) nas folhas novas (a), folhas intermediárias (b), folhas velhas (c), colmo (d) e raízes (e) na suficiência e deficiência de ferro (Fe), associado à ausência (-Si) e presença (+Si) de Si em plantas de cana-energia da cultivar VX2. *e**: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente e ^{ns}: não significativo pelo teste-F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si na mesma condição de Fe; e letras maiúsculas em relação ao Fe na mesma condição de Si pelo teste de Tukey. Barras representam o erro padrão da média.

A diminuição do conteúdo de Fe no tecido foliar induziu uma condição de estresse observada pelo aumento do índice de extravasamento de eletrólitos celulares, sobretudo em plantas cultivadas na ausência de Si. No entanto, a oferta do elemento diminuiu o extravasamento de eletrólitos celulares na

condição de deficiência de Fe, sendo semelhante ao observado em plantas cultivadas na suficiência (Fig. 4a).

A deficiência de Fe diminuiu o conteúdo de clorofilas e carotenoides, mas a adição de Si na solução nutritiva aumentou a quantidade desses pigmentos fotossintéticos nas plantas de cana-energia (Fig. 4b-c). O incremento obtido em pigmentos fotossintéticos refletiu em aumento na eficiência fotossintética, expressa em valores de Fv/Fm, que se manteve semelhante aos observados na condição de suficiência de Fe (Fig. 4d).

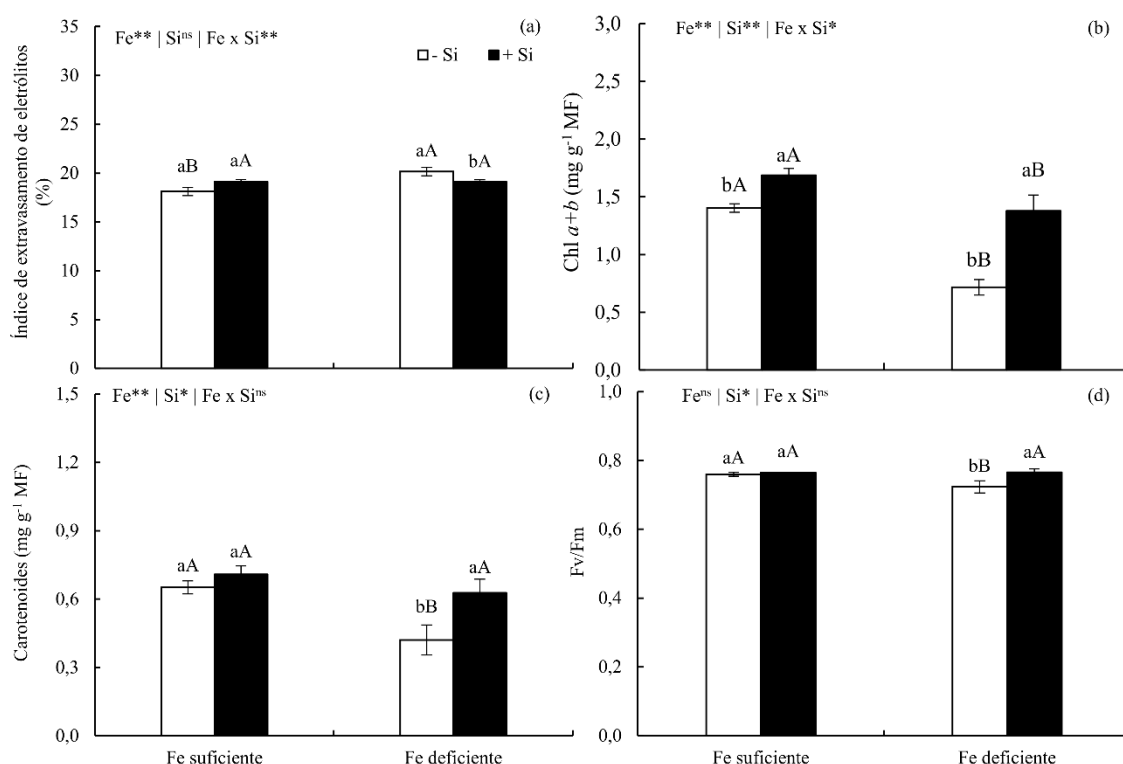


Figura 4. Índice de extravasamento de eletrólitos (a), conteúdo de clorofila total (Chl a+b), carotenoides (c) e eficiência quântica do FSII (Fv/Fm) (d) na suficiência e deficiência de ferro (Fe), associado a ausência (-Si) e presença (+Si) de Si em plantas de cana-energia da cultivar VX2. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste-F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si na mesma condição de Fe; e letras maiúsculas em relação ao Fe na mesma condição de Si pelo teste de Tukey. Barras representam o erro padrão da média.

Segundo Marschner (1995), a biossíntese da clorofila necessita de duas enzimas-chave: a catalase e a peroxidase, que são muito sensíveis à deficiência de Fe. Este efeito da deficiência de Fe limitou a eficiência

fotossintética, pois diminuiu os valores de F_v/F_m , comprometendo o processo do fotossistema II (YADAVALLI et al., 2012).

Contudo, com a adição de Si na solução de cultivo os danos associados a deficiência de Fe favoreceram a integridade das membranas pois diminuiu o índice de extravasamento celular das plantas de cana-energia, fato também verificado em plantas de sorgo submetidas à deficiência de Fe (TEIXEIRA et al., 2020) e de Mn (OLIVEIRA et al., 2019). O efeito do Si em plantas deficientes de Fe em induzir ativação do sistema antioxidante para manter integridade e a homeostase celular foram relatados em plantas de pepino (BITYUTSKII et al., 2014) e cevada (NIKOLIC et al., 2019).

O benefício antioxidante do Si nas plantas com deficiência férrica refletiu na preservação dos pigmentos fotossintéticos clorofila e carotenoides, e combinados com a maior quantidade de Fe na planta, induziu síntese da clorofila, pois este micronutriente compõe o precursor deste pigmento (MARSH et al., 1963).

Assim, o Si foi capaz de aumentar a absorção de Fe pelas plantas e através disso, diminuir os estresses associados à deficiência nutricional deste micronutriente em plantas de cana-energia. Isso ocorreu devido à ativação do sistema antioxidante a partir do aumento do conteúdo de Fe na planta, pois ele é constituinte de enzimas antioxidantes (MARSH et al., 1963; GRATÃO et al., 2005) e também recebeu contribuição do aumento do composto antioxidante carotenoides que segundo Havaux (2014) tem ação na diminuição da formação de espécies reativas de oxigênio.

A eficiência de absorção de Fe diminuiu na condição de deficiência férrica, mas a oferta de Si induziu aumento (Fig. 5a). As eficiências de transporte e de uso aumentaram nas plantas sob deficiência nutricional (Fig. 5b-c).

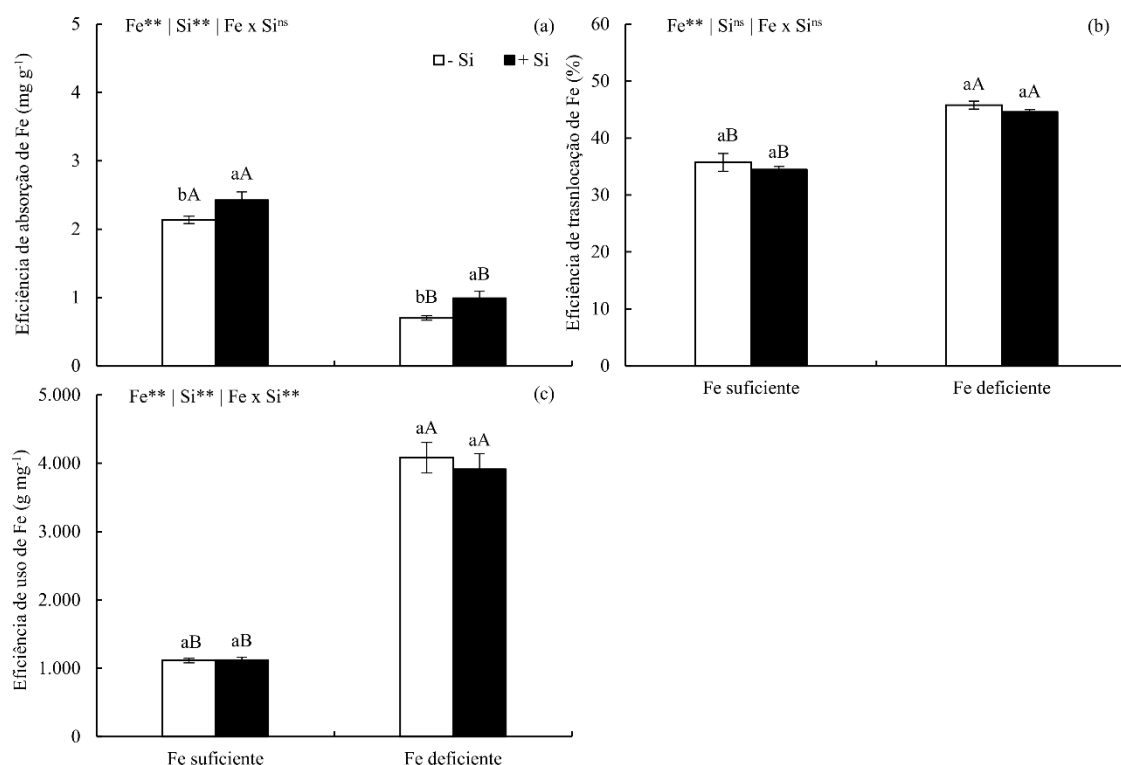


Figura 5. Eficiência de absorção (a), translocação (b) e utilização de ferro (Fe) (c) na suficiência e deficiência de Fe associado a ausência (-Si) presença (+Si) de Si em plantas de cana-energia da cultivar VX2. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste-F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si na mesma condição de Fe; e letras maiúsculas em relação ao Fe na mesma condição de Si pelo teste de Tukey. Barras representam o erro padrão da média.

O Si pode diminuir a ocorrência de calosidade nos vasos condutores, facilitando a movimentação do Fe no floema, sendo este o responsável pelos efeitos observados nas plantas (DONCHEVA et al., 2009). Com uma quantidade maior de Fe no floema, possibilitou-se o incremento na concentração de Fe nas folhas novas, que são mais fotossinteticamente ativas, em relação às velhas (Fig. 3a-e). Portanto, constatou-se pela primeira vez o benefício do Si no aumento do acúmulo de Fe das plantas de cana-energia, fato também relatado em pesquisas recentes em plantas de cevada (NIKOLIC et al., 2019) e de sorgo (TEIXEIRA et al., 2020).

As plantas de cana-energia com deficiência férrica cultivada na solução nutritiva na presença de Si aumentaram a eficiência de absorção de Fe. O Si

pode ser considerado um elemento eficaz no aumento da eficiência de transporte e uso do micronutriente.

A massa seca das folhas diminuiu com a deficiência de Fe, no entanto, o fornecimento de Si manteve a produção de massa seca semelhante a observada em plantas cultivadas sob suficiência do micronutriente (Fig. 6a). A deficiência de Fe não causou diminuição na massa seca do colmo, mas a presença de Si aumentou a massa seca do colmo na condição de deficiência de Fe (Fig. 6b).

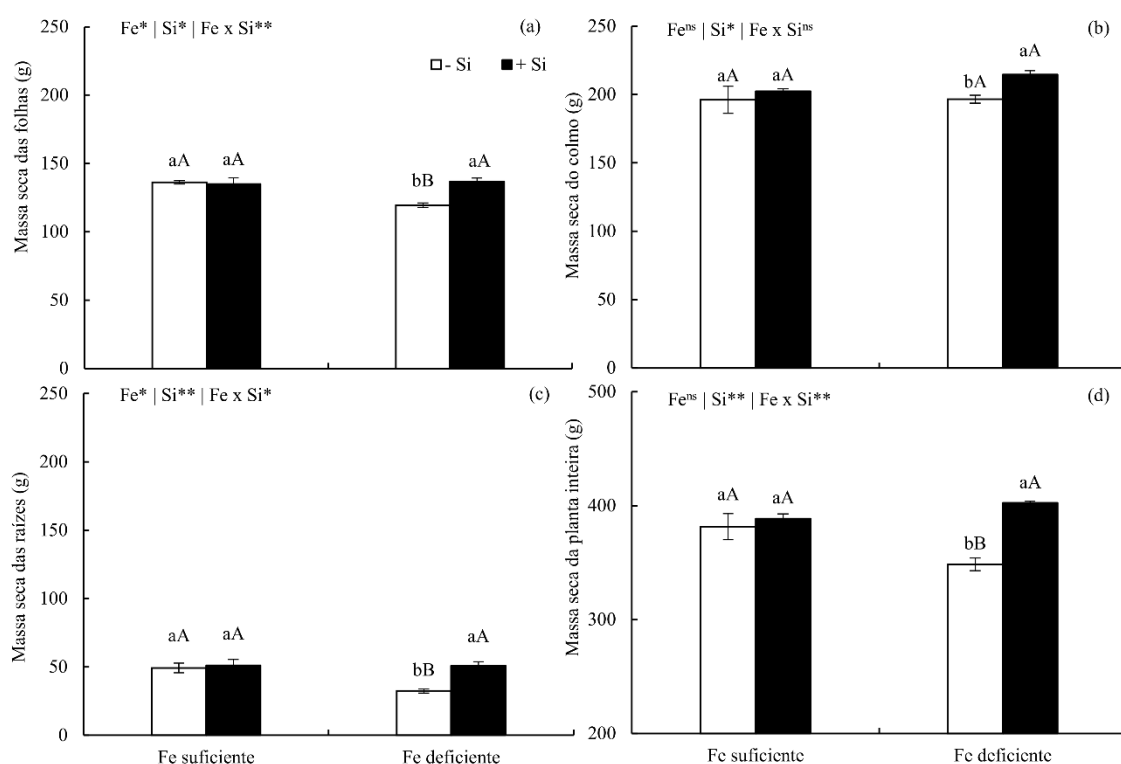


Figura 6. Massa seca das folhas (a), colmo (b), raízes (c) e planta inteira (d) na suficiência e deficiência de ferro (Fe) associado a ausência (-Si) e presença (+Si) de Si em plantas de cana-energia da cultivar VX2. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste-F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si na mesma condição de Fe; e letras maiúsculas em relação ao Fe na mesma condição de Si pelo teste de Tukey. Barras representam o erro padrão da média.

A produção de massa seca das raízes diminuiu com a deficiência de Fe, e nessa condição o Si contribuiu para manter a massa semelhante a observada em plantas sob suficiência do micronutriente (Fig. 6c).

A massa seca da planta inteira também foi afetada de forma negativa pela deficiência de Fe, diminuindo em até 10%, em relação as plantas sob suficiência do micronutriente. No entanto, o fornecimento de Si incrementou a sua massa seca em 16%, em relação à ausência de Si (Fig. 6d).

5. CONCLUSÕES

Conclui-se que a cultivar VX2 de cana-energia é sensível à deficiência férrica moderada. Porém o Si pode ser utilizado como uma estratégia de manejo nutricional, proporcionando aumento no acúmulo de Fe, diminuindo assim, os estresses causados pela deficiência desse micronutriente.

6. LITERATURA CITADA

ABADIA VENTURA, Matheus Vinicius et al. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi in the establishment of pre-broken sugar cane. **Poljoprivreda i Sumarstvo**, v. 64, n. 3, p. 149-157, 2018.

ALSCHER, Christian; BEYN, Wolf-Jürgen. Simulating the motion of the leech: a biomechanical application of DAEs. **Numerical Algorithms**, v. 19, n. 1, p. 1-12, 1998.

BARBOSA, José Carlos; MALDONADO-JUNIOR, Walter. Agrostat-Sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Versão 1.0. **Jaboticabal: Departamento de Ciências Exatas**, 2010.

BERNAL, Andressa Picionieri et al. Vinasse biogas for energy generation in Brazil: An assessment of economic feasibility, energy potential and avoided CO₂ emissions. **Journal of cleaner production**, v. 151, p. 260-271, 2017.

BIENERT, Gerd et al. Specific aquaporins facilitate the diffusion of hydrogen peroxide across membranes. **Journal of Biological Chemistry**, v. 282, n. 2, p. 1183-1192, 2007.

BIRCHALL, Jonathan David. The essentiality of silicon in biology. **Chemical Society Reviews**, v. 24, n. 5, p. 351-357, 1995.

BITYUTSKII, Nikolai et al. Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of metal-mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. **Plant physiology and Biochemistry**, v. 74, p. 205-211, 2014.

BRESSIANI, José Antônio. Seleção seqüencial em cana-de-açúcar. (Tese doutorado). Piracicaba: ESALQ/USP, 2001.

BRIAT, Jean-François; DUBOS, Christian; GAYMARD, Frédéric. Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. **Trends in Plant Science**, v. 20, n. 1, p. 33-40, 2015.

BROWN, JOHN. Mechanism of iron uptake by plants. **Plant, Cell & Environment**, v. 1, n. 4, p. 249-257, 1978.

BUCHELT, Antonio Carlos. Silício na mitigação de deficiência nutricional e formas de aplicação via fertirrigação e foliar em plantas forrageiras. Tese (Doutorado em Agronomia) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Câmpus de Jaboticabal, 2019.

CAVALCANTI, Roberta Q. et al. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 189, p. 140-147, 2019.

CAVERSAN, Amanda Suellen. **Modelo matemático para planejamento do plantio e colheita da cana-de-açúcar e da cana-energia**. 2017. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Bauru.

CHANEY, Stephen; BOYER, Paul Delos. Incorporation of water oxygens into intracellular nucleotides and RNA: II. Predominantly hydrolytic RNA turnover in *Escherichia coli*. **Journal of molecular biology**, v. 64, n. 3, p. 581-591, 1972.

CORDEIRO, Carla Fabrícia de Araujo et al. Consumo e digestibilidade total dos nutrientes e produção e composição do leite de vacas alimentadas com teores crescentes de proteína bruta na dieta contendo cana-de-açúcar e concentrados. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 36, n. 6, p. 2118-2126, 2007.

CRUSCIOL, Carlos Alexandre Costa et al. Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e amendoim. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 2, p. 404-410, 2013.

ABADIA VENTURA, Matheus Vinicius et al. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi in the establishment of pre-broken sugar cane. **Poljoprivreda i Sumarstvo**, v. 64, n. 3, p. 149-157, 2018.

DECHEN, Antônio Roque; NACHTIGALL, Gilmar Ribeiro. Elementos requeridos à nutrição de plantas. **Embrapa Uva e Vinho-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2007.

DELÚ-FILHO, Nelson. **Efeito do N-NO- 3 sobre o crescimento e atividade das enzimas de assimilação do nitrogênio em plantas jovens de**

seringueira (Hevea brasiliensis Muell. Arg.) Lavras, Universidade Federal de Lavras, 1994. 87p. 1994. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal)—Universidade Federal de Lavras, Lavras.

DIONISIO-SESE, Maribel; TOBITA, Satoshi. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science**, v. 135, n. 1, p. 1-9, 1998.

DONCHEVA, Stela et al. Silicon amelioration of manganese toxicity in Mn-sensitive and Mn-tolerant maize varieties. **Environmental and Experimental Botany**, v. 65, n. 2-3, p. 189-197, 2009.

EPSTEIN, Emanuel. Silicon. **Annual review of plant biology**, v. 50, n. 1, p. 641-664, 1999.

FAGERIA, Nand Kumar; BALIGAR, Virupax. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in agronomy**, v. 88, p. 97-185, 2005.

FOURCROY, Pierre et al. Involvement of the ABCG 37 transporter in secretion of scopoletin and derivatives by Arabidopsis roots in response to iron deficiency. **New Phytologist**, v. 201, n. 1, p. 155-167, 2014.

FREITAS, Lucas Barbosa de et al. Foliar fertilization with silicon in maize. **Revista Ceres**, v. 58, n. 2, p. 262-267, 2011.

GODOY, Claudia Vieira et al. Doenças da soja. **Manual de fitopatologia**, v. 2, p. 657-676, 2016.

GRATÃO, Priscila Lupino. et al. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional plant biology**, v. 32, n. 6, p. 481-494, 2005.

GUERINOT, Mary Lou; YI, Ying. Iron: nutritious, noxious, and not readily available. **Plant Physiology**, v. 104, n. 3, p. 815, 1994.

HAVAUX, Michel. Carotenoid oxidation products as stress signals in plants. **The Plant Journal**, v. 79, n. 4, p. 597-606, 2014.

HENRY, Robert J.; KOLE, Chittaranjan (Ed.). **Genetics, genomics and breeding of sugarcane**. CRC Press, 2010.

HERNÁNDEZ, Christian et al. Wheat straw, corn stover, sugarcane, and Agave biomasses: chemical properties, availability, and cellulosic-bioethanol

production potential in Mexico. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 13, n. 5, p. 1143-1159, 2019.

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

HOAGLAND, Dennis Robert et al. The water-culture method for growing plants without soil. **Circular. California agricultural experiment station**, v. 347, n. 2nd edit, 1950.

JIANG, Wei et al. Changes on structural properties of biomass pretreated by combined deacetylation with liquid hot water and its effect on enzymatic hydrolysis. **Bioresource technology**, v. 220, p. 448-456, 2016.

JUCOSKI, Gládis de Oliveira et al. Excesso de ferro sobre o crescimento e a composição mineral em *Eugenia uniflora* L. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 4, p. 720-728, 2016.

KÄMPF, Nestor. O ferro no solo. In: REUNIÃO SOBRE FERRO EM SOLOS INUNDADOS, 1., Goiânia, 1988. Anais. Goiânia, EMBRAPA/CNPAP, 1988.

KIM, Misook; DAY, Donal. Composition of sugar cane, energy cane, and sweet sorghum suitable for ethanol production at Louisiana sugar mills. **Journal of industrial microbiology and biotechnology**, v. 38, n. 7, p. 803-807, 2011.

KORNDÖRFER, Gaspar Henrique; DATNOFF, Lawrence.; CORRÊA, Gilberto Fernandes. Influence of silicon on grain discoloration and upland rice grown on four savanna soils of Brazil. **Journal of plant nutrition**, v. 22, n. 1, p. 93-102, 1999.

KORNDÖRFER, Ingo; DOMMEL, Monica; SKERRA, Arne. Structure of the periplasmic chaperone Skp suggests functional similarity with cytosolic chaperones despite differing architecture. **Nature structural & molecular biology**, v. 11, n. 10, p. 1015-1020, 2004.

KRASKA, Joseph Eugene; BREITENBECK, Gary. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 41, n. 17, p. 2075-2085, 2010.

KUBICKI, James; HEANEY, Peter. Molecular orbital modeling of aqueous organosilicon complexes: Implications for silica biomineralization. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 67, n. 21, p. 4113-4121, 2003.

KUDRYAVTSEV, Pavel Gennadievich; FIGOVSKY, Oleg. System of storage and hydrogen generation for power propulsion systems and cars. **Alternative Energy and Ecology (ISJAE)**, n. 13-14, p. 46-55, 2016.

LICHTENTHALER, Hartmut. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in enzymology**, v. 148, p. 350-382, 1987.

LICHTENTHÄLER, Ramona et al. Total oxidant scavenging capacities of Euterpe oleracea Mart.(Acai) fruits. **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, v. 56, n. 1, p. 53-64, 2005.

LIU, Yunyun et al. Sequential bioethanol and biogas production from sugarcane bagasse based on high solids fed-batch SSF. **Energy**, v. 90, p. 1199-1205, 2015.

MA, Jian Feng.; MIYAKE, Yoshihiro; TAKAHASHI, Eiichi. Silicon as a beneficial element for crop plants. **Studies in plant Science**, v. 8, p. 17-39, 2001.

MARAFON, Anderson Carlos et al. Use of sugarcane vinasse to biogas, bioenergy, and biofertilizer production. In: **Sugarcane biorefinery, technology and perspectives**. Academic Press, 2020. p. 179-194.

MARIANO, Adriano Pinto et al. Butanol production in a first-generation Brazilian sugarcane biorefinery: technical aspects and economics of greenfield projects. **Bioresource technology**, v. 135, p. 316-323, 2013.

MARIANO, Eduardo et al. Influence of nitrogen form supply on soil mineral nitrogen dynamics, nitrogen uptake, and productivity of sugarcane. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p. 641-650, 2015.

MARIN, Fabio; NASSIF, Daniel SP. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 232-239, 2013.

MARSCHNER, Horst; RÖMHELD, Volker. In vivo measurement of root-induced pH changes at the soil-root interface: effect of plant species and nitrogen source. **Zeitschrift für Pflanzenphysiologie**, v. 111, n. 3, p. 241-251, 1983.

MARSCHNER, Horst. Mineral nutrition of higher plants. 2nd. **Edn. Academic Pres**, 1995.

MARSH, James; EVANS, Howard; MATRONE, Gennard. Investigations of the role of iron in chlorophyll metabolism. II. Effect of iron deficiency on chlorophyll synthesis. **Plant Physiology**, v. 38, n. 6, p. 638, 1963.

MATSON, Pamela; NAYLOR, Rosamond; ORTIZ-MONASTERIO, Ivan. Integration of environmental, agronomic, and economic aspects of fertilizer management. **Science**, v. 280, n. 5360, p. 112-115, 1998.

MATSUOKA, Sizuo et al. Energy cane: its concept, development, characteristics, and prospects. **Advances in Botany**, v. 2014, 2014.

MITANI, Namiki et al. Identification and characterization of maize and barley Lsi2-like silicon efflux transporters reveals a distinct silicon uptake system from that in rice. **The Plant Cell**, v. 21, n. 7, p. 2133-2142, 2009.

MIYAKE, Yasuto; TAKAHASHI, Eiichi. Effect of silicon on the growth of soybean plants in a solution culture. **Soil science and plant nutrition**, v. 31, n. 4, p. 625-636, 1985.

MOURA, Romero Marinho; OLIVEIRA, Idjane Santana. Controle populacional de *Pratylenchus zeae* em cana-de-açúcar em dois ambientes edáficos no Nordeste do Brasil. **Nematologia Brasileira**, v. 33, n. 1, p. 67-73, 2009.

NIKOLIC, Dragana. et al. Silicon alleviates iron deficiency in barley by enhancing expression of Strategy II genes and metal redistribution. **Frontiers in plant science**, v. 10, p. 416, 2019.

NIKOLIC, Milica; ROBERT, Rohan Jeffry; GIRISH, C. R. The adsorption of cadmium, nickel, zinc, copper and lead from wastewater using tea fiber waste. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 14, n. 19, p. 7272-7284, 2019.

OKUNO, Fábio Makoto et al. Technical and Economic Parameters of Sugarcane Straw Recovery: Baling and Integral Harvesting. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 4, p. 930-943, 2019.

OKUNO, Fábio Makoto. **Desempenho econômico de um sistema de produção de biomassa da cana energia**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA FILHO, Francisco X. de et al. Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 186-193, 2015.

OLIVEIRA, Raimundo Leonardo Lima et al. Different sources of silicon by foliar spraying on the growth and gas exchange in sorghum. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, n. 4, p. 948-953, 2019.

PEDROSO, André de Faria et al. Aditivos químicos e inoculante bacteriano na ensilagem de cana-de-açúcar: efeitos sobre a fermentação das silagens e o desempenho de garrotes. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n. 6, p. 1181-1187, 2011.

PEREIRA DA SILVA, Carine et al. Optimization of the Production Parameters of Composites from Sugarcane Bagasse and Iron Salts for Use in Dye Adsorption. **The Scientific World Journal**, v. 2019, 2019.

RAVEN, John Albert. The transport and function of silicon in plants. **Biological reviews**, v. 58, n. 2, p. 179-207, 1983.

RODRIGUES, Clarissa Perdomo; CAMARGO, Juliana Alves. Bagaço de cana-de-açúcar como potencial para cogeração de energia elétrica e etanol celulósico. **São Joaquim da Barra: Colégio Iara, Coimbra**, 2008.

SANTOS, Gustavo Alves. **Silício na produção de cana-de-açúcar**. 2017. 111 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2017.69>.

SANTOS, Luiz Cláudio Nascimento et al. Response of Pre-sprouted Sugarcane Seedlings to Foliar Spraying of Potassium Silicate, Sodium and Potassium

Silicate, Nanosilica and Monosilicic Acid. **Sugar Tech**, v. 22, n. 5, p. 773-781, 2020.

SANTOS, Márcia Masson Mendes dos. Biofortificação do tomateiro com silício via foliar pulverização foliar com diferentes fontes. 2018. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Câmpus de Jaboticabal, 2018.

SANTOS-FILHO, Benedito Gomes. Ferro na planta. **Reunião sobre ferro em solos inundados, Goiânia, Brazil. Goiânia (Brazil): CNPAF**. p, p. 72-93, 1988.

SARMENTO, Pedro Luã Vieira de Souza. **Produção de cana-energia e suas características energéticas em condição tropical**. 2019. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Produção Vegetal. Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2019.

SOUZA, Ronessa Bartolomeu. **Sintomas de deficiências nutricionais**. 2018. Disponível em:<

<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cebola/arvore/CONT000gusd7pip02wx7ha0g934vgi0a6eu6.html>>. Acessado em 10 de jan de 2021.

TEIXEIRA, Gelza Carliane Marques et al. Root-and foliar-applied silicon modifies C: N: P ratio and increases the nutritional efficiency of pre-sprouted sugarcane seedlings under water deficit. **Plos one**, v. 15, n. 10, p. e0240847, 2020.

TEIXEIRA, Gelza Carliane Marques et al. Silício na mitigação dos estresses por deficiência de manganês e pelo déficit hídrico em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. **Científica**, v. 48, n. 2, p. 170-187, 2020.

TEIXEIRA, Gelza Carliane Marques et al. Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the effects of water deficit after transplanting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 3, p. 849-859, 2020.

TRONC, Elisabeth; CHANÉAC, Corinne; JOLIVET, Jean-Pierre. Structural and Magnetic Characterization of ϵ -Fe₂O₃. **Journal of Solid State Chemistry**, v. 139, n. 1, p. 93-104, 1998.

ULISSES, Edjane dos Anjos. Respostas morfofisiológicas de genótipos de cana-de-açúcar e cana energia sob diferentes regimes hídricos na fase inicial de crescimento. 2016. 91 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) – Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós Graduação em Agronomia: Produção Vegetal, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2016.

VASANTHI, Srinivasan; SALEENA, Lilly.; RAJ, Anthoni. Silicon in crop production and crop protection-a review. **Agricultural Reviews**, v. 35, n. 1, 2014.

VILLAR, María Cana; SEOANE, Susana Menéndez. El fondo documental de la Autoridad Portuaria de Ferrol-San Cibrao: un bien patrimonial. In: **El futuro de las humanidades**. 2007. p. 63-70.

YADAVALLI, Venkateswarlu et al. Differential degradation of photosystem I subunits under iron deficiency in rice. **Journal of plant physiology**, v. 169, n. 8, p. 753-759, 2012.