

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**SILÍCIO COMO MITIGADOR DE DEFICIÊNCIAS NUTRICIONAIS EM PLANTAS
DE SORGO**

MAILA SIMOGAKI

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientadora: MSc. Gelza Carliane Marques Teixeira

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

Jaboticabal - SP

1º semestre/2021

S593s	Simogaki, Maila Silício como mitigador de deficiências nutricionais em plantas de sorgo / Maila Simogaki. -- Jaboticabal, 2021 35 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. Elementos traços na nutrição de plantas. 2. Plantas Nutrição. 3. Adubos e fertilizantes. I. Título.
-------	--

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

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CÂMPUS DE JABOTICABAL

DEPARTAMENTO: Departamento de Ciências da Produção Agrícola FCAV/UNESP –
Câmpus de Jaboticabal.

CERTIFICADO
TRABALHO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

TÍTULO: SILÍCIO COMO MITIGADOR DE DEFICIÊNCIAS NUTRICIONAIS EM
PLANTAS DE SORGO

ACADÊMICO: MAILA SIMOGAKI

CURSO: ENGENHARIA AGRONÔMICA

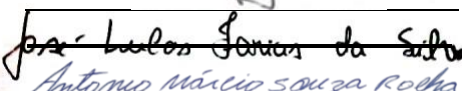
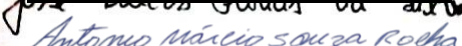
ORIENTADOR: Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO

COORIENTADORA: M. Sc. GELZA CARLIANE MARQUES TEIXEIRA

PERÍODO: Mês/Ano À Mês/Ano

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. José Lucas Farias da Silva	
Membro	Dr. Antônio Márcio Souza Rocha	

Jaboticabal 28 / 04 / 2021

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 24 / 05 / 2021



Chefe do Departamento

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

MAILA SIMOGAKI, natural de Barrinha – São Paulo, Brasil, com nascimento em 14 de abril de 1999, filha de Fabiana Batiston. Nessa cidade do interior de São Paulo, cresceu e estudou no seu ensino fundamental “EMEF Darvi Mascaro” e no ensino médio se formou também em técnica em Agropecuária em Colégio técnico agrícola “José Bonifácio” no Campus da UNESP-Jaboticabal. Em 2017 ingressou no curso de Engenharia Agrônômica pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Campus de Jaboticabal.

Dedico

À minha mãe Fabiana Batiston, aos meus avós Wilson Batiston e Nilza Gonçalves Batiston, e ao meu irmão Mayki Simogaki, por sempre estarem comigo, apoiando, ajudando, tanto fisicamente quanto emocionalmente e por sempre acreditarem no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado até aqui e me dado forças quando parecia não ter de onde retirá-las. Por ter me dado paciência e calma para tomar as decisões corretas.

A toda minha família que sempre me apoiaram em todas as fases, minha mãe, Fabiana Batiston, meus avós, Wilson e Nilza, meu irmão, Mayki Simogaki, meu namorado, Gabriel Garcia que sempre esteve ao meu lado na jornada da graduação, me fez ter calma e acreditar que tudo era possível. A república Boazona, Bússola, Recruta, Ismirnofay, Polenguinha, Iludida, Olx, Bãfi, Nazaré, Batina, Fuzuê, Escape, Cardume, Menstru e Zina. O meu muito obrigada por terem feito parte da minha trajetória e por todo apoio que me deram.

Em especial, gostaria de agradecer à minha mãe, que sempre acreditou em mim e nunca desistiu mesmo passando por toda a dificuldade. Uma mãe solteira que mesmo com todos os problemas pessoais nunca se deixou abalar e refletir aos seus filhos. Obrigada por nunca ter medido esforços para me fazer chegar até aqui. Você é a maior inspiração que eu poderia ter.

Aos meus avós um carinho especial, pois nunca nos deixaram faltar nada, sempre com tanta paciência e dedicação e o principal, amor. Obrigada por serem essas pessoas tão maravilhosas e por terem feito parte da minha vida, amo vocês.

Aos meus amigos de Jaboticabal, que tornaram esse caminho menos difícil e me auxiliaram sempre com ajuda psicológica e muito incentivo, e que tornaram essa faculdade inesquecível. Em especial às minhas amigas mais próximas, Pecado e Diantêra, aos meus amigos Didico e Paizana.

Gostaria de agradecer a equipe do Gringo bar e café de Jaboticabal, por ter me dado a oportunidade de trabalhar fazendo com que eu pudesse ter uma estabilidade financeira.

À minha coorientadora que mesmo com as dificuldades da pandemia não podendo ter o contato presencial me fez sentir acolhida, Gelza Carliane Marques Teixeira. Agradeço por todo o apoio, orientação e por ter me ensinado tanto. Muito obrigada por me passar o seu conhecimento, e me auxiliar em todas as minhas

dúvidas. Agradeço também por esse jeito paciente e calmo, que me fez estar mais tranquila nessa escrita, você é uma pessoa especial.

Ao Professor Doutor Renato de Mello Prado, pela orientação, paciência e, sobretudo, pela oportunidade da realização deste trabalho, minha profunda admiração e respeito e inspiração em pessoa na área da Engenharia Agrônômica e na vida.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, por ter toda a estrutura e oportunidade para adquirir o máximo de conhecimento, e por ter profissionais de Excelência para nos passar todo seu conhecimento.

A todas as pessoas que fizeram parte da minha formação até aqui, meus sinceros agradecimentos.

ÍNDICE

I. RESUMO	7
I. SUMMARY	8
1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1 Silício como atenuador de deficiências nutricionais	10
2.2 Exigências nutricionais da cultura do sorgo	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1 Material vegetal e condições de crescimento	17
3.2 Tratamentos e delineamento experimental	17
3.3 Variáveis analisadas	18
3.3.1 Eficiência quântica do fotossistema II (PSII)	18
3.3.2 Altura e diâmetro.....	18
3.3.3 Produção da massa seca.....	19
3.3.4 Concentração do Sí	19
3.3.5 Análise estatística	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
5. CONCLUSÕES	37
6. REFERÊNCIAS.....	38

1. RESUMO

O sorgo é uma cultura de grande importância econômica, sendo cultivo principalmente devido a sua elevada adaptabilidade a condições de baixa fertilidade de solo. No entanto, o cultivo nessas áreas pode induzir deficiências nutricionais na cultura, limitando o seu desenvolvimento inicial com reflexos na diminuição da produção. Uma estratégia para melhorar o desempenho produtivo da cultura e a eficiência das adubações é a adição de (Si), um elemento benéfico que atenua os danos causados por estresses abióticos, como as deficiências nutricionais. O objetivo desse trabalho foi avaliar os danos causados pela deficiência de macronutrientes no crescimento inicial de plantas de sorgo, bem como, se o Si é eficiente na mitigação dessas deficiências. Os tratamentos consistiram em um esquema fatorial de 7 x 2, sendo o primeiro fator constituído pelo fornecimento de uma solução completa (CS) de Hoagland and Arnon (1950) mais omissões dos seguintes macronutrientes: nitrogênio (-N), fósforo (-P), potássio (-K), cálcio (-Ca), magnésio (-Mg) e enxofre (-S); e o segundo fator, constituído pelo fornecimento de Si: ausência (-Si) e presença (+Si), na concentração de 2,0 mmol L⁻¹. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com seis repetições. Foram avaliados o acúmulo de Si na parte aérea e nas raízes, eficiência quântica do fotossistema II, diâmetro do caule, altura da planta, massa seca da parte aérea e das raízes. O fornecimento de Si proporcionou aumento do acúmulo do elemento na parte aérea e nas raízes. Os nutrientes que mais limitaram a produção de massa seca em plantas na fase inicial de desenvolvimento de plantas de sorgo cultivadas na ausência de Si foram o N e o Ca. No entanto, o Si na solução de cultivo foi eficiente para mitigar os danos causados pela deficiência nutricional apenas de P e Ca.

Palavras-chave: Nutrientes, Sorgo, Deficiências, diminuição.

2. SUMMARY

Sorbe is a crop of great economic importance, being cultivated mainly due to its high adaptability to conditions of low soil fertility. However, cultivation in these areas can induce nutritional deficiencies in the crop, limiting its initial development with repercussions on the decrease in production. A strategy to improve crop productive performance and fertilization efficiency is the addition of (Si), a beneficial element that mitigates damage caused by abiotic stresses, such as nutritional deficiencies. The objective of this work was to evaluate the damage caused by macronutrient deficiency in the initial growth of sorb plants, as well as whether Si is efficient in mitigating these deficiencies. The treatments consisted of a scheme in a factorial scheme of 7 x 2, being the first factor consisting of the supply of a complete solution (SC) of Hoagland and Arnon (1950) and others with the same solution but with the suppression of macronutrients, with absence of nitrogen (-N), phosphorus (-P), potassium (-K), calcium (-Ca), magnesium (-Mg), sulfur (-S) and more control (all nutrients); and the second factor consisting of the supply of Si: absence (-Si) and presence (+Si). The experimental design used was randomized blocks with six replications. Si was added to the nutrient solution using the concentration of 2.0 mmol L⁻¹. Si accumulation in shoots and roots, quantum efficiency of photosystem II, stem diameter, plant height, shoot and root dry mass were evaluated. The supply of Si provided an increase in the accumulation of the element in the shoots and roots. The nutrients that most limited dry mass production in plants in the initial phase of development of sorb plants grown in the absence of Si were N and Ca. However, Si in the cultivation solution was efficient to mitigate the damage caused by nutritional deficiency only of P and Ca.

Keywords: Nutrients, sorghum, Deficiencies, Decrease.

3. INTRODUÇÃO

O silício (Si) é um elemento benéfico às plantas abundante na terra, apesar do Si não ser considerado um elemento essencial para as plantas, as plantas submetidas à estresses apresentam menores danos quando suplementadas com Si (Teixeira et al., 2020). Os efeitos mitigadores do Si devem-se a sua deposição em células do tecido foliar, tornando a planta mais rígida e resistente, além de melhorar o rendimento fotossintético, causando efeitos no crescimento e produção de massa seca das plantas (Gomes et al., 2011).

Entre os estresses ambientais as deficiências nutricionais são frequentes e causam graves danos ao desenvolvimento das plantas, sobretudo, as cultivadas em solos de baixa fertilidade, como o sorgo (*Sorghum bicolor* L.). O sorgo é um cereal de grande importância econômica, por ser utilizado como fonte alimentícia para produção de ração que compõe as dietas de animais, bem como, destinado ao consumo humano (Ribas, 2003). Esta cultura é mais produzida em ambientes com temperatura mais elevadas e sua exigência nutricional é primeiramente, o N, seguido do K, Ca, Mg e P (Martinez et al., 1999).

O sorgo é considerado uma cultura acumuladora de Si, que pertence à família Poaceae e possui mecanismo ativo de absorção do elemento (Ma et al., 2006). Dessa forma, o sorgo é uma planta com potencial para resposta as aplicações de Si podendo ser utilizado para alívio de danos causados por estresses ambientais (Souza et al., 2013). Assim, acredita-se que o Si pode ser utilizado em adubações com o objetivo de minimizar os danos causados pela deficiência de macronutrientes em plantas de sorgo.

O presente estudo teve como objetivo analisar os danos causados pelas deficiências nutricionais de macronutrientes na fase inicial de plantas de sorgo e o efeito do fornecimento de Si via solução nutritiva como um potencial mitigador dos danos causados por essas deficiências.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Silício como atenuador de deficiências nutricionais

O silício (Si) é o segundo elemento mais encontrado na crosta terrestre, perdendo apenas para o oxigênio (Peixoto, 2001). O Si pode ser encontrado em minerais primários, secundários ou adsorvido aos coloides, sendo abundantemente presente no solo na forma de óxido de Si (Menegale et al., 2015). No entanto, a forma absorvida pelas plantas é o ácido monossílico (H_2SiO_4), que apresenta baixa concentração na solução do solo (Cavalcante, 2013).

A sua disponibilidade nos solos é influenciada pelo nível de intemperismo, estando presente em maior quantidade em solos mais jovens, como os Cambissolos (Menegale et al., 2015), em comparação à solos mais intemperizados, como os Latossolos (Tisdale et al., 1985). Assim, devido ao alto grau de intemperismo dos solos do Brasil, o Si representa cerca de 5 a 40% na sua composição (Ma et al., 2001). Além disso, a disponibilidade desse elemento também depende de características do solo, como o pH, que aumenta proporcionalmente a sua dissociação, e consequentemente, a sua disponibilidade para as plantas (Oliveira et al., 2007). O elemento pode ser adicionado ao solo através da aplicação de fertilizantes silicatados ou ainda pela decomposição de resíduos vegetais (Jones e Handreck, 1967).

O Si não é considerado um elemento essencial às plantas, pois não atende aos critérios de essencialidade dos nutrientes (Jones e Handreck, 1967). No entanto, Epstein e Bloom (2015), indicaram que plantas privadas desse elemento podem “exibir anormalidades em seu crescimento, desenvolvimento ou reprodução”, sendo assim, cumprindo critérios da nova definição de essencialidade de nutrientes.

Apesar da divergência sobre a sua essencialidade, as pesquisas realizadas com o elemento têm mostrado efeitos benéficos importantes que refletem em aumento no crescimento e produção de diversas plantas, sobretudo, quando submetidas à estresses ambientais (Menegale et al., 2015). Os efeitos proporcionados pelo Si são mais evidentes em plantas da família Poaceae, como o sorgo, pois esse grupo de plantas são classificadas como acumuladora do elemento por possuírem proteínas de membranas especializadas na sua absorção e transporte para a parte

aérea, sintetizadas a partir de gene específico em cada espécie (Ma e Takahashi, 2002).

Nas plantas, o Si pode ser acumulado nas folhas, caule e nos grãos, sendo a maior quantidade observada em folhas e caule. As plantas classificadas como acumuladoras, possuem teores entre 100 a 150 g kg⁻¹ de Si (Menegale et al., 2015). Portanto, elas absorver o elemento de forma ativa porque possuem proteínas nas membranas, bem como, a partir da solução do solo na forma passiva, acompanhando o fluxo de massa da água (Myake e Takahashi, 1983).

Após a absorção, o Si é transcolado pelo xilema até à parte aérea na mesma forma química que é absorvido, sendo depositado na parede celular das células da epiderme das folhas, na camada subcuticular e nos espaços intercelulares (Buchelt et al., 2020). Devido ao processo de evaporação da água ou o seu transporte para outros tecidos, o ácido monossilícico se condensa em sílica gel polimerizada, não podendo ser redistribuído pela planta, tornando-se imóvel (Ma et al., 2011).

O Si possui uma grande capacidade de minimizar danos que são causados por estresse nas plantas, pois quando são supridas com Si demonstram maior capacidade de suportar as perturbações fisiológicas (Teixeira et al., 2020a). Isso provavelmente se deve as modificações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas induzidas pela presença do Si, como a melhoria no sistema antioxidante, especificamente com a ação de enzimas como a dismutase do superóxido (SOD) e a glutathione redutase (GRS) (Curvelo et al., 2013). O Si pode ser encontrado na parede celular da epiderme das folhas, colmos e cascas, pois o elemento é depositado na forma de gel que formam uma camada sílica-cutícula e sílica-celulose (Raven, 2003). Essa deposição de Si deixa a planta mais rígida na parede celular, aumentando a resistência das plantas à diversos fatores, como ao acamamento, ataque de insetos, incidência de doenças (Barbosa Filho et al., 2001) e deficiências nutricionais (cite um artigo que mostrou esse efeito).

Associado a isso, ocorre uma melhoria na interceptação da luz nas plantas, diminuindo assim a transpiração (Barbosa Filho et al., 2001) e aumentando a tolerância a estresses, como o hídrico (Berni e Prabhu, 2003). O Si também pode ser usado também para diminuir os efeitos de danos causados por problemas de temperatura, metais tóxicos pesados e veranicos (Barbosa Filho et al., 2000; Crusciol

et al., 2009; Abdalla, 2011; Prabagar et al., 2011). Esses metais pesados citados acima podem ser manganês, ferro e alumínio (Hodson e Evans, 1995), isso pode ser comprovado em um estudo feito pelo Liang et al. (2007), que utilizou a cultura do arroz e pepino e obteve sucesso comprovando essa teoria.

Dentre os fatores abióticos nas plantas, podemos destacar a deficiência nutricional. Plantas que não são fertilizadas adequadamente sofrem com a diminuição do seu potencial produtivo, pois deficiências nutricionais causam comprometimento nas funções metabólicas, levando a desordens fisiológicas que comprometem o alcance da produtividade desejada (Prado, 2020). Em plantas sob estresses causados por deficiência de micronutrientes, o Si tem sido associado a melhorias do sistema antioxidante (Felisberto, 2018; Oliveira et al., 2019), mantendo a integridade dos pigmentos fotossintetizantes, como visto em plantas deficientes em ferro (Fe) (Teixeira et al., 2020b; Gonzalo et al., 2013; Pavlovic et al., 2013).

O Si também contribuiu no alívio dos danos causados pela deficiência de manganês (Mn) em plantas de cana-de-açúcar, por aumentar o acúmulo de Mn, que é responsável pela manutenção do transporte e de elétrons entre fotossistemas e prevenção da fotoinibição do fotossistema II (FSII) na etapa fotoquímica da fotossíntese (Teixeira et al., 2020). Soma-se a isso, a atuação do Si na ativação de enzimas do sistema antioxidante de defesa das plantas, que diminui a degradação das membranas dos pigmentos fotossintéticos, como a clorofila e os carotenoides, atenuando os danos ao FSII (Gong et al., 2012; Cao et al., 2015). Um desses efeitos também foi observado em plantas de sorgo, onde o Si atuou na manutenção de funcionamento FSII submetidas a deficiência de Mn (Oliveira et al., 2020).

Efeitos do Si na atenuação de deficiências nutricionais de macronutrientes também são encontradas na literatura. Os danos causados pela deficiência de nitrogênio (N) foram aliviados pelo fornecimento de Si na cultura do arroz, sendo demonstrada pelo aumento na produção (Deus et al., 2019). Em plantas de sorgo deficientes em potássio (K), o Si diminuiu visualmente os sintomas de clorose e necrose nas folhas mais velhas (Chen et al., 2016), isso se deve ao fato de o K influenciar na redução do acúmulo de putrescina, que são compostos nitrogenados que em altas concentrações tornam-se tóxico aos vegetais (Prado, 2008).

Sobre a deficiência de cálcio (Ca) também podem ser encontrados trabalhos indicando que o Si forma complexos com polímeros estruturais das células, tais como pectinas e calose (Boylston et al., 1990) e também ligações cruzadas com ligninas e carboidratos via associações com ácidos fenólicos ou anéis aromáticos (Inanaga et al., 1995), concluindo que é possível que em plantas com deficiência de Ca o Si auxilie na estrutura e na junção de componentes da parede celular a qual o nutriente esteja envolvido (Buchelt et al., 2020).

A aplicação de Si em plantas de milho expostas à deficiência de magnésio (Mg) regulou os metabólitos primários e aumentou os níveis de fito-hormônios (citocinina), mantendo assim o crescimento e o desenvolvimento das plantas mesmo com a deficiência desse nutriente (Hosseini et al., 2019).

Relatos em plantas deficientes em enxofre (S) também são encontrados. Maillard et al. (2018), constataram que na cultura da cevada submetida à deficiência de S, o Si influencia no metabolismo das plantas retardando a senescência das folhas e mantendo o maior teor de clorofila, nas raízes das plantas deficientes em S, o Si aumenta a absorção de sulfato e nitrato. Aumentando a absorção do nitrato, ocorre incremento nas quantidades de glutamina e de prolina. No entanto, os relatos sobre o uso de Si na mitigação de macronutrientes em plantas de sorgo ainda são restritos.

4.2 Exigências nutricionais da cultura do sorgo

O sorgo (*Sorghum bicolor*) é o quinto cereal mais produzido no mundo (perdendo para o trigo, o arroz, o milho e a cevada) (FAO, 2014). É uma fonte alimentícia humana e animal muito importante, os grãos podem ser utilizados na produção de farinha para panificação, amido industrial e álcool, e a palhada, como forragem ou cobertura de solo (Borém, 2005). O sorgo contém altos teores de ferro, zinco, proteínas, fibras e vitaminas; além da presença de compostos fenólicos que possuem alta capacidade antioxidante, sendo esses auxiliares no combate a doenças crônicas (como obesidade, diabetes e câncer) (Queiroz et al., 2009).

O sorgo é comumente plantado em regiões de temperatura mais elevadas. Ele pode ser utilizado de diferentes formas como o consumo de grãos para alimentação humana e também animal e como matéria prima para produção de bebidas, de álcool

e até mesmo ser utilizado como forrageira para animais (Ribas, 2003). A produção de sorgo pode ser dividida em quatro subgrupos, sendo: granífero; forrageiro para silagem; forrageiro para pastejo e vassoura. Desses grupos, o granífero é o que tem mais importância econômica ficando entre os cereais mais cultivados hoje em dia no mundo (Ribas, 2003).

O cultivo do sorgo tem se expandido devido a elevada rusticidade da cultura. No entanto, apesar dessa característica, para obtenção de elevados níveis de produtividade, exige-se que a demanda nutricional da cultura seja atendida (Venanzoni, 2018). Existem indicações de que os nutrientes mais exigidos dessa cultura são primeiramente, o N, seguido do K, Ca, Mg e P. Estima-se que para obtenção de uma produção de $6,0 \text{ t ha}^{-1}$, a planta absorve de $23\text{-}29 \text{ g kg}^{-1}$ de N, $13\text{-}30 \text{ g kg}^{-1}$ de K (Martinez et al., 1999). Já entre os micronutrientes, o que apresenta maior demanda é o Fe, seguido do Mn, cobre (Cu) e molibdênio (Mo) (Boareto et al., 2009).

Para o adequado manejo e adubação do sorgo, é importante observar sobre a reposição de nutrientes que deverá ser feita em plantios seguintes devido aos nutrientes que são exportados, porque são mobilizados para partes da planta onde não se há devolução ao solo, como o P e o N que são praticamente todo translocados para os grãos, logo depois se K, Mg e Ca (Coelho, 2015).

Associado a isso, deve-se considerar a variação na demanda nutricional nas fases de desenvolvimento da cultura, para fornecer a quantidade adequada, no momento apropriado. O ciclo da cultura do sorgo é marcado por fases de intensa absorção dos macronutrientes (N, P, K), ocorrendo primeiramente no período V7 (Cerca de 50% da matéria seca dos grãos já foram acumulados aproximadamente cerca de 70 dias após a emergência, e o peso do colmo diminui.) da cultura, quando a planta se encontra na época de potencial formação de grãos. Havendo também uma intensa absorção dos mesmos, na fase reprodutiva onde a planta já alcançou seu potencial reprodutivo (Coelho, 2015). Já o K tem a marcha de absorção de outro modo, tendo sua máxima absorção no período vegetativo e acúmulo nos primeiros 30 a 40 dias do seu desenvolvimento (Coelho, 2015), isso sugere maior necessidade de K na sua fase inicial.

Em um estudo realizado por Tisdale et al. (1985), a cultura tem sua maior absorção de N, P, K nos primeiros 40 dias após a emergência, depois no seu florescimento que é aproximadamente 60 dias após a emergência, tendo no final da cultura um maior acúmulo também.

4.3 Uso do silício na cultura do sorgo

A cultura do sorgo é considerada acumuladora de Si por pertencer a família Poaceae (Ma e Yamaji, 2006). Dessa forma, a planta responde bem as aplicações de Si, sendo relatado efeitos benéficos no alívio de tensões abióticas, como por deficiência hídrica, estresse por salinidade, e as causadas por desordens nutricionais (Souza et al., 2013).

O Si tem sido indicado no manejo sanitário para diminuir a severidade de doenças em plantas de sorgo (EPSTEIN et al., 2011). Santos et al. (2014), demonstraram queda de aproximadamente 65% na severidade da antracnose no genótipo de sorgo DOW 1F305 suplementadas com 500 kg ha⁻¹ de Si em comparação com as plantas não suplementadas. Em outro estudo sobre o sorgo relacionado ao Si, foi demonstrado que os danos causados pelo ataque de pulgões, umas das pragas mais prejudicial no cultivo de sorgo, pois suga a seiva extraída das folhas limitando água e nutrientes, foi diminuída pela realização da adubação com Si (Costa, 2003). Além disso, a presença de Si no sorgo, pode reduzir o estresse hídrico e por salinidade, aliviando os sintomas da seca e diminuindo a absorção de sódio pelas raízes das plantas, respectivamente (Camargo et al., 2017).

Na atenuação de deficiências nutricionais em plantas de sorgo também são encontrados efeitos, mas restritos aos micronutrientes. A aplicação de Si tanto por via radicular quanto por via pulverização foliar diminuiu os danos causados pela deficiência de Mn em plantas de sorgo, por aumentar a atividade de enzimas do sistema antioxidante e, assim, diminuiu a peroxidação lipídica, aumentou a taxa fotossintética e a eficiência de uso de Mn, refletindo em maior produção de massa seca (Oliveira et al., 2019). Isso ocorre porque tem sido verificado que esse elemento benéfico melhora o metabolismo das plantas submetidas a estresses causados por desordens nutricionais, como a deficiência de Fe, onde plantas de sorgo

apresentaram aumento da eficiência de uso deste micronutriente (Teixeira et al., 2020a). E da eficiência de uso de Mn em plantas de sorgo (Oliveira et al., 2019) e do rendimento de plantas de milho e sorgo (Oliveira et al., 2020).

Dessa forma, acredita-se que é possível potencializar as adubações com macro e micronutrientes, combinando as suas aplicações com a adição de Si (Coelho, 2015). Para o fornecimento de Si às culturas pode ser utilizada a escória de siderurgia, que é uma fonte de Si abundante no País, sendo constituída basicamente por silicato de cálcio e magnésio e termofosfatos magnesianos (Korndörfer e Datnoff, 1995). No entanto, são fontes de baixa solubilidade em água e podem, dependendo da origem, apresentar traços de metais potencialmente tóxicos (Freitas et al., 2011).

Contudo, o uso dessas fontes pouco solúveis exige uma grande quantidade para aplicação do Si, podendo inviabilizar esta aplicação. Assim, uma opção é o fornecimento de Si aplicando o silicato de potássio ou silicato de sódio, pois esses silicatos são fontes são solúveis e concentradas, podendo se fazer a aplicação via foliar ou a aplicação através da fertirrigação, que facilita mais a absorção desses elementos nas plantas (Freitas et al., 2011).

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Material vegetal e condições de crescimento

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação na Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus de Jaboticabal. Os dados de temperatura e umidade relativa do ar da casa de vegetação foram registrados diariamente com um termo-higrômetro, sendo a média da umidade relativa mínima ($25 \pm 5\%$) e máxima ($80 \pm 5\%$), e temperatura mínima ($18 \pm 2^\circ\text{C}$) e máxima ($35 \pm 5^\circ\text{C}$).

5.2 Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos consistiram em um esquema fatorial de 7×2 . O primeiro fator foi constituído pelo fornecimento de uma solução completa (CS) de Hoagland and Arnon (1950) e outras com a mesma solução mas com a supressão dos seguintes macronutrientes: nitrogênio (-N), fósforo (-P), potássio (-K), cálcio (-Ca), magnésio (-Mg), enxofre (-S) e o segundo fator constituído pelo fornecimento de Si: ausência (-Si) e presença (+Si) com a concentração de 2 mmol L^{-1} . O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com seis repetições.

Sementes de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) da cultivar Dekalb (DKB) 540 foram semeadas em bandejas de poliestireno contendo vermiculita de textura média como substrato. A vermiculita possuiu uniformidade na composição química e granulométrica, porosidade, capacidade de retenção de água de 50%, com base na argila mineral tipo 2:1.

Aos 10 dias após a semeadura (DAS), as mudas tiveram as suas raízes lavadas com água destilada para obter uma completa limpeza, e então, foram transplantadas para cada vaso de polipropileno de 8 dm^3 preenchido com solução nutritiva com sistema de aeração artificial automática. Após o transplântio, as mudas receberam solução completa com diluição de 25% da solução estoque de nutrientes evitar o estresse por salinidade, por um período de 5 dias.

Após esse período, foram iniciados os tratamentos com a omissão individual dos macronutrientes. As soluções foram preparadas com reagentes p.a. Foi realizado uma alteração na concentração de ferro da solução nutritiva para $368 \mu\text{mol L}^{-1}$ na forma de Fe–EDDHA, conforme indicação de Cavalcante et al. (2019). O valor pH da solução nutritiva foi regulado diariamente e mantido em 5.5 ± 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 $2,0 \text{ mmol L}^{-1}$ porque o elemento em solução começa a polimerizar a partir dos $3,0 \text{ mmol L}^{-1}$ (Birchall, 1995). A fonte de Si solúvel 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). 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 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$.

A renovação das soluções ocorreu a cada seis dias e e aerada continuamente através de sistema de compressão de ar. O período de cultivo das plantas na solução com supressão de macronutrientes foi mantido até o início dos sintomas de deficiência severa, que ocorreram aos 38 DAS para o tratamento livre de N e aos 71 DAS para os demais tratamentos.

5.3 Variáveis analisadas

5.3.1 Eficiência quântica do fotossistema II (PSII)

As medições fotossintéticas do rendimento quântico do PSII 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).

5.3.2 Altura da planta e diâmetro do caule

A altura das plantas foi avaliada utilizando régua graduada, considerando desde a base até o topo das plantas. O diâmetro do caule foi determinado com o uso de paquímetro digital à 2 cm da base da planta.

5.3.3 Produção de massa seca

As plantas foram separadas em parte aérea 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.

5.3.4 Concentração de Si

O teor de Si foi analisado na parte aérea 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.

5.4 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). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey, com 5% de probabilidade, usando o software estatístico SAS® (Cary, NC, EUA).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Nitrogênio (N)

A presença de Si na solução nutritiva proporcionou aumento no acúmulo desse elemento na parte aérea em plantas de sorgo cultivadas sob omissão de N (-N). No entanto, plantas com deficiência de N apresentaram o menor acúmulo de Si na parte aérea em relação aos demais tratamentos, com redução de até 47,5% em relação solução completa (SC), na condição de fornecimento de Si (+Si) (Figura 1).

O menor acúmulo de Si em plantas sob -N deve-se a diminuição da absorção de íons, pois o N é constituinte de transportadores necessários para sua absorção (Fonseca et al., 2008). O Si é depositado principalmente no retículo endoplasmático, paredes celulares e espaços intercelulares como sílica amorfa hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) (Ferri, 1963). Assim, a deficiência nutricional de N limita a ação dos transportadores de diversos nutrientes e elementos da planta (Prado et al., 2007), entre eles o Si, justificando a diminuição no acúmulo desse elemento nas plantas.

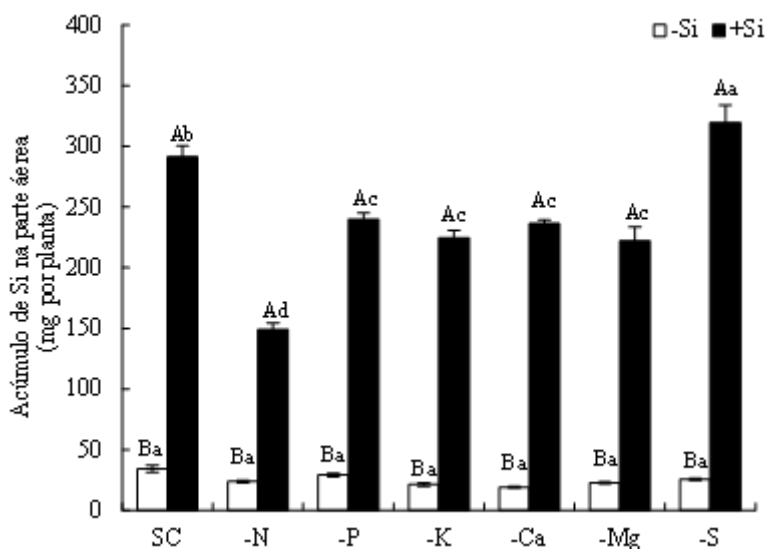


Figura 1. Acúmulo de silício (Si) na parte aérea de plantas de sorgo cultivadas em solução completa (SC) de Hoagland e Arnon (1950) e com omissões (O) de macronutrientes (-N, -P, -K, -Ca, -Mg, -S) na ausência (-Si) e presença de Si (+Si). Letras maiúsculas demonstram diferença do efeito das omissões dentro da mesma condição de Si. Letras minúsculas demonstram diferença do efeito do Si dentro da mesma condição de omissão pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam o erro padrão da média.

Para o acúmulo de Si nas raízes, os resultados foram semelhantes aos observados na parte aérea, onde as plantas cultivadas em -N com fornecimento de Si na solução nutritiva apresentaram maior acúmulo em relação a -Si. Entre as plantas com omissão de macronutrientes não houve diferença significativa do acúmulo quando o Si não foi fornecido na solução nutritiva. Apesar de apresentar semelhança estatística o tratamento -N+Si teve um acúmulo de 15% a mais quando comparado a SC+Si (Figura 2).

O Si absorvido pelas plantas é facilmente translocado no xilema e frequentemente polimeriza-se se associando a compostos orgânicos como proteínas, polissacarídeos e lignina (Epstein, 1994). Portanto, esse resultado sugere que plantas com deficiência de N podem ter maior dificuldade para translocar o Si absorvido pelas raízes para a parte aérea devido a participação do N como constituinte das moléculas transportadoras de Si pelos tecidos celulares, afetando as eficiências de translocação e uso desse elemento (Ávila et al., 2010). Resultados semelhantes foram encontrados por Santi et al. (2006) que demonstraram haver diminuição na absorção iônica com a omissão do N na cultura do sorgo.

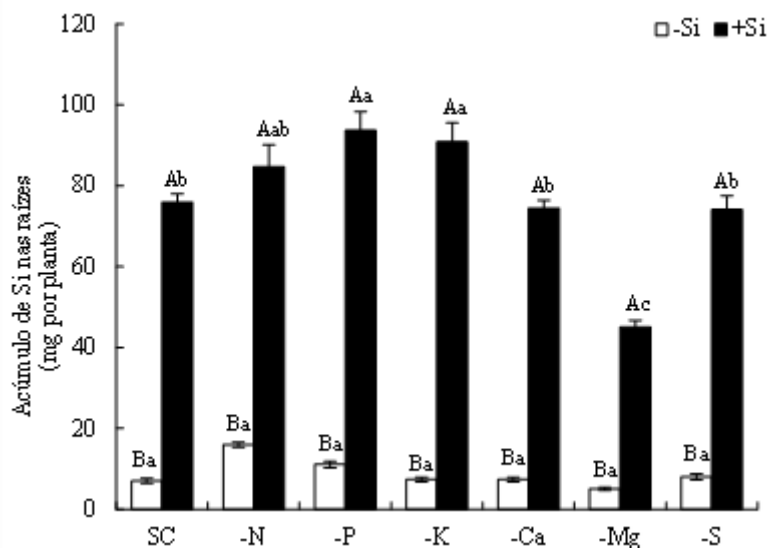


Figura 2. Acúmulo de silício (Si) nas raízes de plantas de sorgo cultivadas em solução completa (SC) de Hoagland e Arnon (1950) e com omissões (O) de macronutrientes (-N, -P, -K, -Ca, -Mg, -S) na ausência (-Si) e presença de Si (+Si). Letras minúsculas demonstram diferença do efeito das omissões dentro da mesma condição de Si. Letras maiúsculas demonstram diferença do efeito do Si dentro da mesma condição de omissão pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam o erro padrão da média.

Para a eficiência fotossintética do fotossistema II (PSII) (Fv/Fm) as plantas cultivadas em deficiência de N apresentaram redução de até 20% e 3% respectivamente, quando comparados a SC, na condição de ausência e presença de Si. É possível observar que, a deficiência de N causou uma relevante diminuição neste parâmetro fotossintético, assemelhando-se apenas ao tratamento -S na condição de ausência de Si. No entanto, as plantas de sorgo cultivadas em -N com a adição do Si apresentaram uma eficiência quântica do PSII semelhante a obtida em plantas sob SC, mostrando que o Si proporciona efeitos mitigadores dos danos fotossintéticos causados pela deficiência de N em plantas de sorgo (Figura 3).

A falta da disponibilidade do N afeta a taxa de assimilação de carbono nas plantas, pois o nutriente insere-se na constituição de componentes do sistema fotossintético, tais como clorofilas e as enzimas ribulose 1,5 bispfosfato (RubisCO) e carboxilase do fosfoenolpiruvato (PEPcase) (Correia et al., 2005). Portanto a deficiência de N causa redução do conteúdo de clorofila (Ciompi et al., 1996), da quantidade de tecido paliádico (Kozlowski e Pallardy, 1997), e da atividade de algumas enzimas o ciclo redutivo do carbono (Sugiharto et al., 1990), justificando os danos obtidos na eficiência quântica do fotossistema II e consequentemente, a atividade fotossintética.

No entanto, ficou evidente que o fornecimento de Si às plantas de sorgo sob deficiência de N proporciona efeito mitigador dos danos causados no aparato fotossintético. Chen et al. (2016) relataram esses efeitos benéficos em plantas em estresse nutricional tratadas com Si que apresentaram maior eficiência do PSII. Dessa forma, as taxas de fotossíntese, transpiração e condutância estomática são melhoradas pelo fornecimento deste elemento benéfico (Oliveira, 2017), além de também amenizar a degradação dos pigmentos clorofilianos e carotenoides (Muneer e Jeong, 2015). Com esses resultados é possível compreender os efeitos obtidos em plantas com deficiência de N associada a presença e ausência de Si.

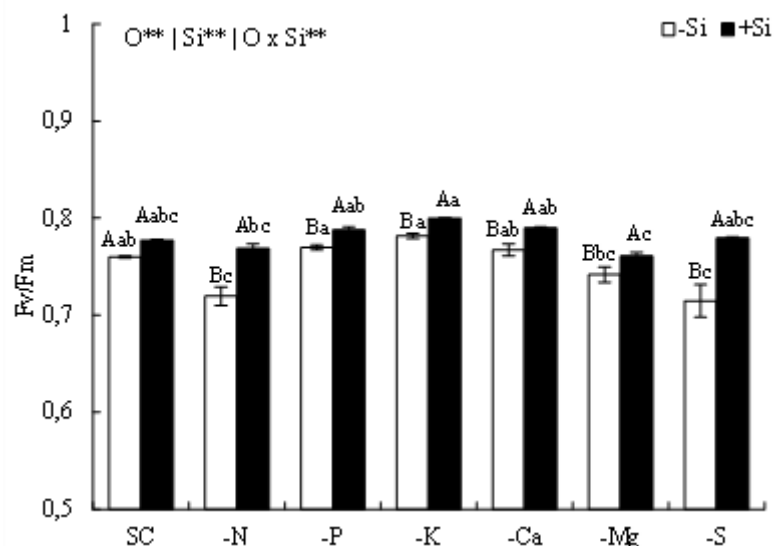


Figura 3. Eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm) em plantas de sorgo cultivadas em solução completa (SC) de Hoagland e Arnon (1950) e com omissões (O) de macronutrientes (-N, -P, -K, -Ca, -Mg, -S) na ausência (-Si) e presença de Si (+Si). Letras minúsculas demonstram diferença do efeito das omissões dentro da mesma condição de Si. Letras maiúsculas demonstram diferença do efeito do Si dentro da mesma condição de omissão pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam o erro padrão da média.

A omissão de N levou a planta a ter um menor diâmetro de caule dentre todas as omissões dos macronutrientes, tanto na presença quanto na ausência de Si. Não foi observado efeito mitigador do Si provavelmente devido a severidade dos danos causados pela deficiência de N, com diminuição do diâmetro do caule de até 45% em comparação a solução completa (Figura 4).

A deficiência de N causa distúrbios no processo fotossintético das plantas porque esse nutriente está ligado a formação da clorofila e sua ausência ocasiona modificações no cloroplasto, com reflexos no seu crescimento (Malavolta et al., 1997), como visto para o diâmetro do caule. Resultados semelhantes foram evidenciados por Fonseca et al. (2008), onde o diâmetro do caule em plantas sob -N foi inferior aos obtidos nas deficiências dos demais macronutrientes.

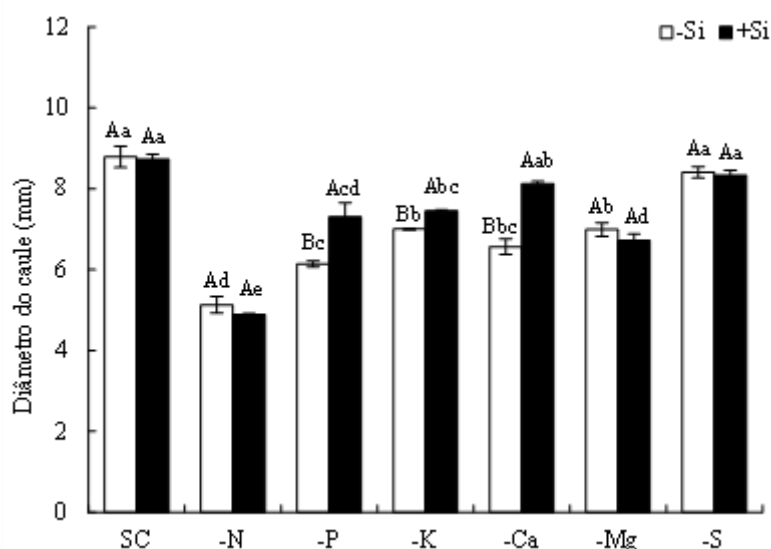


Figura 4. Diâmetro do caule de plantas de sorgo cultivadas em solução completa (SC) de Hoagland e Arnon (1950) e com omissões (O) de macronutrientes (-N, -P, -K, -Ca, -Mg, -S) na ausência (-Si) e presença de Si (+Si). Letras minúsculas demonstram diferença do efeito das omissões dentro da mesma condição de Si. Letras maiúsculas demonstram diferença do efeito do Si dentro da mesma condição de omissão pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam o erro padrão da média.

A omissão de N causou severa diminuição no crescimento das plantas, obtendo-se as menores alturas tanto na presença quanto na ausência de Si, assemelhando-se apenas a condição de -Ca. Neste tratamento as plantas que tiveram a omissão de N, diminuíram a altura em até 45% e 42,5% na ausência e presença do Si, respectivamente, comprando-se as plantas sob SC. Assim, apesar do aumento de 2,5%, o fornecimento de Si não foi suficiente para proporcionar efeito mitigador nas plantas com deficiências de N (Figura 5).

Isso se deu pelo fato de que o N é o nutriente mais exigido pelas plantas, ou seja, a falta dele dificulta extremamente o crescimento. Um estudo feito por Fonseca et al. (2008), mostrou que a omissão de N paralisou o crescimento de plantas de sorgo a partir de sete dias após o início dos tratamentos. Essas evidências estão análogas a literatura que indica que em plantas sob condições de deficiência de N o processo de divisão celular nos pontos de crescimento é retardado, o que resulta em menor altura das plantas (Arnon, 1975).

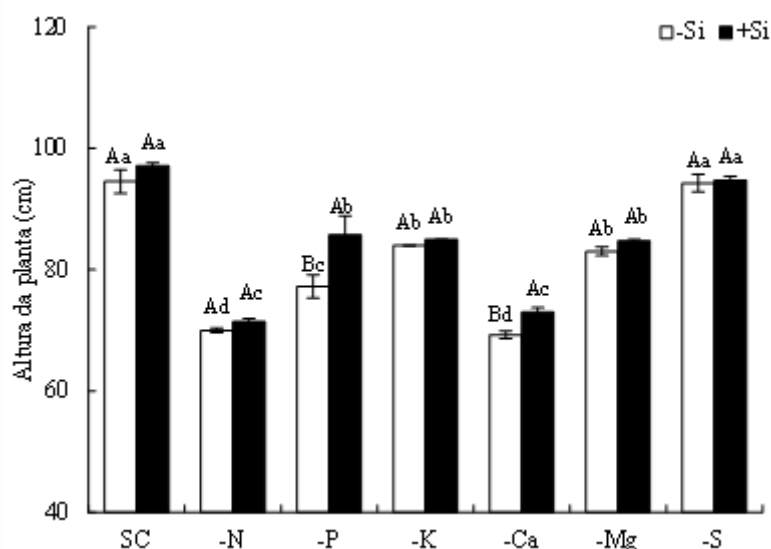


Figura 5. Altura da planta de sorgo cultivadas em solução completa (SC) de Hoagland e Arnon (1950) e com omissões (O) de macronutrientes (-N, -P, -K, -Ca, -Mg, -S) na ausência (-Si) e presença de Si (+Si). Letras minúsculas demonstram diferença do efeito das omissões dentro da mesma condição de Si. Letras maiúsculas demonstram diferença do efeito do Si dentro da mesma condição de omissão pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam o erro padrão da média.

A deficiência de N também causou as maiores diminuições na produção de massa seca da parte aérea das plantas cultivadas em solução -N, com perda de 62% e 65%, na ausência e presença de Si, respectivamente, comparado com as plantas que foram submetidas a solução completa (SC). A severidade dos danos causados pela omissão de N da solução nutritiva foi tão intensa que a presença do Si não foi suficiente para mitigar a diminuição na massa seca da parte aérea (Figura 6).

A brusca diminuição da massa seca da parte aérea se dá pelo fato de que a omissão do N causa uma deficiência em todas as partes da planta, diminuindo seu crescimento e desenvolvimento, afetando principalmente as folhas. O menor crescimento das plantas causa efeitos negativos na produção de massa seca, e isso se deve à diminuição da concentração de proteínas e da atividade da redutase de nitrato promovida pela deficiência de N (Silveira e Crocomo, 1989). A falta do N também traz sintomas como clorose e necrose das folhas, este sintoma está associado com a menor produção de clorofila, ocasionando modificação nos cloroplastos (Mendes, 1959).

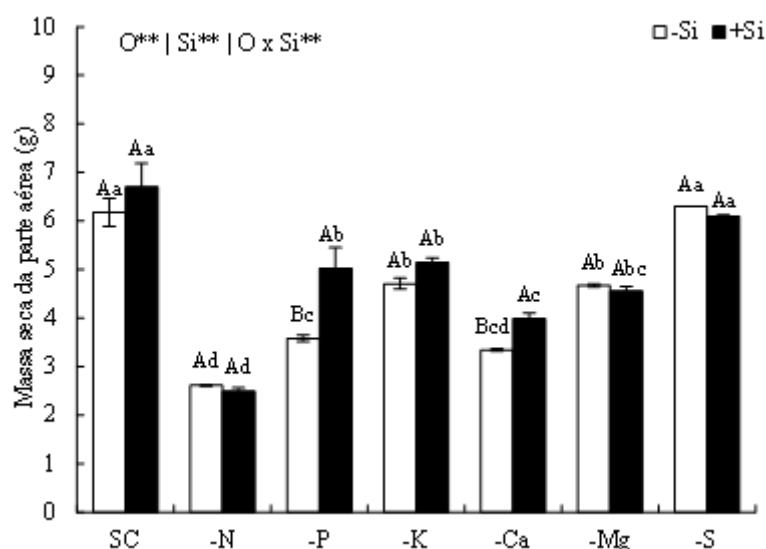


Figura 6. Massa seca da parte aérea de plantas de sorgo cultivadas em solução completa (SC) de Hoagland e Arnon (1950) e com omissões (O) de macronutrientes (-N, -P, -K, -Ca, -Mg, -S) na ausência (-Si) e presença de Si (+Si). Letras minúsculas demonstram diferença do efeito das omissões dentro da mesma condição de Si. Letras maiúsculas demonstram diferença do efeito do Si dentro da mesma condição de omissão pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam o erro padrão da média.

O desenvolvimento das raízes das plantas sob omissão de N também foi afetado com diminuição da massa seca das raízes, causando perda de 30% e 32% na ausência e presença de Si, respectivamente, comparado com as plantas sob solução completa (SC). No entanto, também não foi observado efeito do fornecimento do Si (Figura 7).

Em outros experimentos feito por Santi et al. (2006) e Fonseca et al. (2008), foram obtidos resultados semelhantes comprovando que plantas com omissão de N apresentam diminuição na produção e acúmulo de massa seca de raízes, como citado para parte aérea, evidenciando que a omissão de N afeta a divisão celular e causa diminuição no peso da massa seca das raízes.

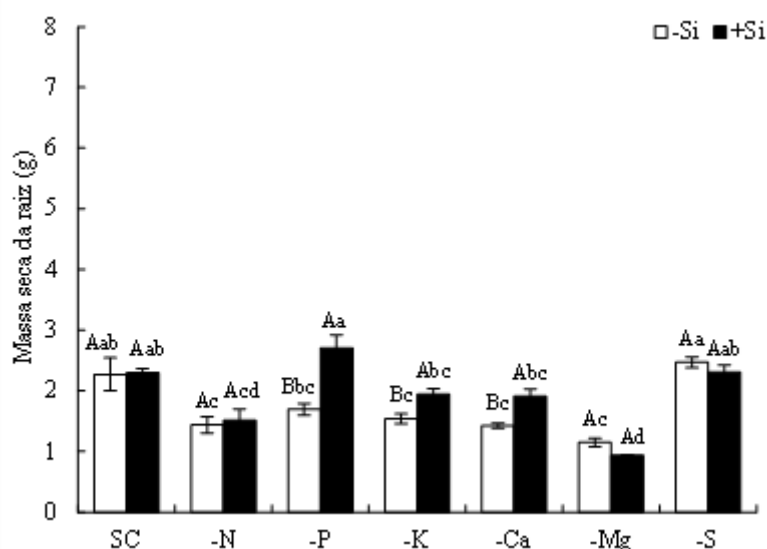


Figura 7. Massa seca da raiz de plantas de sorgo cultivadas em solução completa (SC) de Hoagland e Arnon (1950) e com omissões (O) de macronutrientes (-N, -P, -K, -Ca, -Mg, -S) na ausência (-Si) e presença de Si (+Si). Letras minúsculas demonstram diferença do efeito das omissões dentro da mesma condição de Si. Letras maiúsculas demonstram diferença do efeito do Si dentro da mesma condição de omissão pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam o erro padrão da média.

Com as diminuições causadas na produção de massa seca da parte aérea e das raízes, a massa seca da planta inteira também foi afetada, sendo a deficiência de N a que mais causou perdas na produção de massa seca, sendo de 75% e 73% na ausência e presença de Si, respectivamente, comparado as plantas sob solução completa (Figura 8). Dessa forma, a adição do Si não proporcionou efeitos no alívio dos danos causados pela deficiência de N nas plantas de sorgo sob omissão desse macronutriente.

A omissão de N causou os danos mais severos na produção de massa seca das plantas, em relação aos demais macronutrientes. Isso ocorre porque plantas de sorgo deficientes em N apresentam porte reduzido, tendo uma pequena área foliar e causando também cloroses que diminuem a área fotossintética da planta, refletindo em subdesenvolvimento das plantas (Coelho et al., 2002). O menor crescimento das plantas pode ser explicado também à diminuição da concentração de proteínas e da atividade da redutase de nitrato promovida pela deficiência de N (Silveira e Crocomo, 1989).

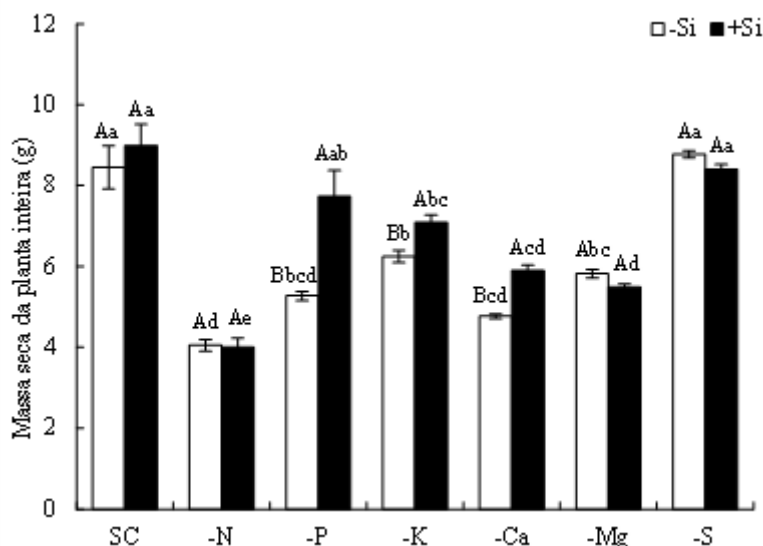


Figura 8. Massa seca da planta inteira de sorgo cultivadas em solução completa (SC) de Hoagland e Arnon (1950) e com omissões (O) de macronutrientes (-N, -P, -K, -Ca, -Mg, -S) na ausência (-Si) e presença de Si (+Si). Letras minúsculas demonstram diferença do efeito das omissões dentro da mesma condição de Si. Letras maiúsculas demonstram diferença do efeito do Si dentro da mesma condição de omissão pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam o erro padrão da média.

6.2 Fósforo (P)

A solução nutritiva oferecida as plantas com a presença do Si, promoveu um aumento desse elemento na parte aérea da planta com omissão de P, em relação às plantas cultivadas na ausência de Si. Na ausência de Si, não houve diferença entre os tratamentos (Figura 1). Em plantas forrageiras o fornecimento de soluções com a presença de Si e P obteve-se aumento no acúmulo de Si na parte aérea, justificando que a adição de P incrementa a absorção de Si (Melo, 2005).

Para a análise das raízes observou-se que a omissão do P proporcionou acúmulo 26% maior ao obtido em plantas sob SC. Sugerindo que a omissão do P limita a translocação de Si das raízes para a parte aérea (Figura 2).

O fósforo atua como regulador de metabolismos, que podem limitar o crescimento da planta. Então a deficiência do mesmo pode provocar um acúmulo dos de amido nos cloroplastos, pois acaba não tendo energia suficiente para a translocação de assimilados, levando em consideração que o processo de carregamento dos assimilados para o floema é necessário energia (Prado, 2006).

Portanto isso nos leva a considerar que não foi possível translocar o elemento Si, por isso há um grande acúmulo nas raízes.

A deficiência de P não afetou a eficiência quântica do PSII na ausência e presença de Si, pois os valores obtidos mantiveram-se semelhantes aos obtidos em plantas sob SC. Apesar disso, a adição de Si na solução nutritiva com omissão de P, proporcionou aumento de 5% em relação a plantas sob SC (Figura 4).

A diminuição no rendimento fotossintético das plantas com deficiência de P deve-se a sua participação em compostos energéticos celulares como o NADPH e ATP disponíveis para o metabolismo do processo fotossintético. Assim, durante a assimilação de carbono, o P é necessário para a produção de ATP a partir de ADP, produção e exportação da triose-P e regeneração da ribulose 1,5 bifsfato (RuBP) (Malavolta et al., 1989).

O aumento da eficiência fotossintética obtida com adição de Si na solução nutritiva com omissão de P, possivelmente deve-se a maior deposição do elemento benéfico na parede celular, contribuindo para manter as folhas mais eretas, aumentando a interceptação de luz (Feng et al., 2010), controlando a condutância estomática e a concentração interna de CO₂, favorecendo a eficiência fotossintética (Kochanová et al., 2014).

A solução nutritiva com a omissão do P causou efeitos prejudiciais para as plantas com diminuição no diâmetro do caule de 28% e 17% na ausência e presença do Si, comparado as plantas sob SC, respectivamente. O Si desempenhou um papel importante como agente mitigador, diminuindo os danos causados em até 11% (Figura 4). Plantas deficientes em P têm seu crescimento retardado por estar ligado também à função estrutural do nutriente e no processo de transferência e armazenamento de energia (Prado et al., 2010), isso explica o menor diâmetro do caule.

Com a omissão do P houve uma diminuição de 37,5% e 20% da altura da planta na ausência e presença do Si, respectivamente. É possível observar que a presença do Si proporcionou alívio nos danos causados pela deficiência, sendo que a planta em -P+Si teve menores danos comparado às cultivadas em SC (Figura 5). Esse fato deve-se ao papel desse nutriente em vários processos metabólicos como a

síntese de proteínas e ácido nucléico (Mengel e Kirkby, 1987), prejudicando o metabolismo da planta.

Os resultados obtidos na produção de massa seca da parte aérea mostram que houve diminuição de 34% e 18% em plantas deficientes em P na presença e ausência do Si, respectivamente, quando comparada a SC. Esse tratamento nos mostra que com a presença do Si, os danos foram menos severos, conseguindo atenuar os sintomas da deficiência (Figura 6). Os efeitos atenuadores do Si justificam-se porque o Si ocupa os sítios de adsorção de P e, com isso, aumenta a disponibilidade de P na solução do solo, então mesmo com baixa disponibilidade de P para a planta, a presença do Si ajudou a absorção do P (Prado e Fernandes, 2001).

A falta de P também causou diminuição da massa seca das raízes com uma diminuição de aproximadamente 22% na planta com omissão de P e -Si. No entanto, com a adição de Si, apesar de não haver diferença significativa plantas deficientes em P apresentaram aumento de até 22% em comparação com as plantas sob SC (Figura 7).

Com a diminuição da massa seca da parte aérea e das raízes, também houve redução na massa seca da planta inteira, sendo de 40% e 4% com ausência e presença do Si, respectivamente, se comparada a SC (Figura 8). No entanto, este trabalho demonstra que a adição de Si na solução nutritiva com omissão de P promove efeitos benéficos que diminuem os danos causados pela falta do nutriente em plantas de sorgo.

6.3 Potássio (K)

O fornecimento de Si via solução nutritiva também proporcionou aumento no acúmulo do elemento na parte aérea em plantas sob -K, no entanto, foi menor ao obtido em plantas sob SC +Si (Figura 1). Nas raízes o acúmulo de Si em plantas sob -K foi maior do que as plantas cultivadas em SC, com aumento de 22% (Figura 2). A alta permeabilidade das membranas das plantas ao K é uma característica importante para vários processos fisiológicos influenciados pelo nutriente, tais como o transporte à longas distâncias (Dechen et al., 1996), isso então pode justificar a falta do transporte do Si para a parte aérea, limitando o transporte do elemento para as demais partes da planta.

Para a eficiência quântica do PSII, a planta que foi submetida a omissão de K, obteve a mesma eficiência das que receberam a solução nutritiva completa em ambas condições de fornecimento de Si. Mas apesar de não significativa, observou-se aumento de 7% nos valores de Fv/Fm, indicando que o rendimento fotossintético de plantas cultivadas na presença de Si é favorecido, e que a ausência de K não prejudica esse parâmetro (Figura 3).

O suprimento com Si promoveu aumentos na eficiência quântica do PSII melhorando a fluorescência da clorofila (Singh et al., 2005), esse efeito indica uma maior absorção e uso da luz durante a fase fotoquímica da fotossíntese, contribuindo para o aumento da taxa de transporte de elétrons através dos fotossistemas (Singh et al., 2005), esclarecendo assim o fato de que a eficiência foi maior na presença do Si.

De maneira semelhante, observou-se modificação no diâmetro do caule, onde as plantas também sofreram diminuição de até 20% e 11% em solução -K, na presença e ausência do Si, respectivamente, quando comparados a SC. Para a deficiência de K a presença de Si diminuiu cerca de 9% dos danos no diâmetro do colmo (Figura 4). A omissão de K na solução nutritiva afeta o metabolismo de outros nutrientes dificultando a sua absorção pelas plantas (Fonseca et al., 2008), isso justifica o menor diâmetro do caule neste caso.

A altura da planta também foi afetada com uma diminuição no crescimento de até 23% e 20% com (-Si) e (+Si) respectivamente, quando comparado a SC. É possível observar que na deficiência de K o crescimento com a presença de Si foi semelhante na altura, sendo que, não tiveram um decréscimo alto como por exemplo, na solução nutritiva com omissão do N (Figura 5).

Em estudos feitos por Nascimento et al. (2017) é citado a importância do K para as plantas sendo que ele ativa a catálise biológica, necessária para o metabolismo de diversos outros nutrientes, além disso, o K possui função osmorreguladora, atua na absorção e perda de água e promove a síntese e translocação do açúcar para os tecidos de armazenagem. Por essas razões o cultivo de plantas na ausência de K diminui o seu crescimento. Plantas de sorgo possuem alta demanda de K com máxima absorção no período vegetativo e acúmulo nos

primeiros 30 a 40 dias do seu desenvolvimento (Coelho, 2015), isso sugere maior necessidade de K na sua fase inicial como foi demonstrado neste trabalho.

Para a omissão de K não se teve uma diminuição muito alta na massa seca da parte aérea comparada aos demais nutrientes, sendo 21% e 16% na ausência e presença do Si, comparados a SC. No entanto, o Si não promoveu efeito mitigador na produção de massa seca da parte aérea de plantas sob -K, havendo apenas um aumento de 5% em +Si em relação a -Si (Figura 6).

Na massa seca das raízes houve uma diminuição de 31% e 10%, na ausência e presença do Si em plantas sob omissão de K, comparadas a SC. Neste caso a diferença tem um número muito expressivo, sendo 21%, ou seja, neste tratamento o Si contribuiu consideravelmente para a produção da massa seca das raízes (Figura 7). A massa seca das raízes e da parte aérea refletiu na massa seca da planta toda, tendo uma diminuição de 24% e 10% na ausência e presença do Si, em relação a SC. Isso evidencia que deficiência de K causa efeitos negativos importantes para o desenvolvimento de plantas de sorgo e que o Si é eficiente em diminuir esses danos (Figura 8).

Ficou evidente que o Si auxiliou o desenvolvimento de plantas com deficiência de K, diminuindo os danos causados pelo estresse. O alívio da deficiência de K em plantas tratadas com Si pode ainda estar relacionado com aperfeiçoamento no transporte hídrico da raiz através de um aumento na atividade das aquaporinas, responsáveis pelo transporte de água nas plantas, e que podem ter a expressão de seus genes (PIPs) estimuladas pelo Si (Chen et al., 2016).

6.4 Cálcio (Ca)

O fornecimento de Si via solução nutritiva aumentou o acúmulo do elemento na parte aérea em plantas cultivadas sob omissão de Ca, no entanto, foi 18% menor ao obtido em plantas sob SC na mesma condição de Si (Figura 1). Para o acúmulo de Si nas raízes, a omissão do Ca teve resultados semelhantes ao de plantas em SC (Figura 2). A absorção do Si da solução do solo é feita de forma ativa por plantas de sorgo (Myake e Takahashi, 1983), justificando o aumento do acúmulo com o seu fornecimento em solução nutritiva.

Para eficiência quântica do PSII os resultados também foram semelhantes, com redução de 6% em plantas cultivadas em solução (-Ca-Si) e aumento de 3% em -Ca+Si em relação as cultivadas sob SC, indicando assim que a presença do Si proporcionou efeito positivo para mitigar os danos fotossintéticos causados por esta desordem nutricional (Figura 3). O Si promove aumento nas concentrações de clorofila por unidade foliar, possibilitando aumento na tolerância da planta quando submetida em níveis baixos e mais altos de luz, ou seja, melhorando a sua eficiência quântica do PSII (Souza et al., 2011).

Nas plantas cultivadas com omissão de Ca, houve redução no diâmetro do caule sendo de 22% e 4,4% na ausência e presença do Si, em relação ao SC. O Si teve um papel muito importante como amenizador dos sintomas de deficiências nutricionais dos macronutrientes, mas sendo ainda mais relevante na solução em omissão do Ca, diminuindo as perdas em até 16% (Figura 4).

Em condições de deficiência de Ca em sorgo, Vasconcellos et al. (1988) descreveram uma redução no crescimento das plantas, incluindo inicialmente danos no diâmetro do caule, e posteriormente em todo o crescimento da planta. O efeito do Si diminuiu os danos no diâmetro do caule porque o elemento auxilia a estrutura de componentes da parede celular (Buchelt, 2019).

A omissão do Ca causou diminuição na altura da planta de 47,5% e 42,5% na ausência e presença do Si (Figura 5). A deficiência de Ca é caracterizada pela redução do crescimento de tecidos meristemáticos, com surgimento de danos inicialmente nas folhas mais jovens (Mengel e Kirkby, 1987). No processo metabólico, o Ca afeta a atividade de hormônio e de enzimas, como os que regulam a senescência e a abscisão das folhas e frutos (Malavolta, 1980; Marschner, 1995), evidenciando que há severos danos causados pela deficiência do Ca.

As plantas que tiveram a omissão do Ca, demonstraram diminuição na massa seca da parte aérea de até 45% e 35%, na presença e ausência do Si comparado a SC (Figura 6). Depois do N, a omissão de Ca foi a que mais prejudicou o crescimento das raízes. Tendo uma queda drástica comparado a SC, podemos então concluir que a falta de Ca causa danos severos à planta, no entanto a presença do Si mitiga proporcionando perdas de até 5% menor.

Na massa seca das raízes a diminuição foi de 10% e se manteve praticamente igual na ausência e presença do Si (Figura 7). A massa seca da planta inteira também foi influenciada pela omissão de Ca da solução nutritiva, onde as plantas apresentaram redução de 42% na ausência de Si, no entanto, quando o Si foi adicionado na solução de cultivo, a redução foi de apenas 26% comparado as plantas sob SC (-Si) (Figura 8).

6.5 Magnésio (Mg)

O acúmulo de Si na parte aérea das plantas na solução com omissão de Mg foi 25% menor quando comparado as plantas que foram submetidas a SC, levando a considerar que a omissão deste nutriente prejudicou o acúmulo do Si na parte aérea das plantas (Figura 1). O acúmulo de Si nas raízes, assim como na parte aérea foi 57% menor quando comparado a SC (Figura 2).

O Mg atua como ativador ou regulador de várias enzimas como, ATPases, carboxilase/oxigenase RuBP e outras do metabolismo de carboidratos (Marschner et al., 2008). Dessa forma, sua deficiência causa redução do crescimento da parte aérea e da raiz (Yang et al., 2013). Sabendo que o Mg participa de reações muito importante no metabolismo da planta, é possível afirmar que a omissão dele pode ter causado um menor acúmulo de Si na parte aérea, já que é necessário ser metabolizado para chegar até a parte aérea e acumular.

Na planta o Mg é translocado das folhas mais velhas para pontos de crescimento, caracterizando-se como um nutriente móvel, a ausência deste nutriente afeta o crescimento das raízes e de toda a planta (Hermans et al., 2004). Estudos feitos por Correia et al. (2012), em plantas de amendoim indicam que omissão do Mg na solução nutritiva afetou outros nutrientes, diminuindo o acúmulo dos macronutrientes na planta inteira, sugerindo que ocorre o mesmo impacto para o acúmulo de Si nas raízes que foi reduzido com a sua omissão.

A eficiência quântica do PSII também foi diminuída, seguindo o mesmo padrão dos outros nutrientes que foram omitidos, sendo de 11% e 6% respectivamente, na ausência e presença do Si (Figura 3), mais uma vez é perceptível a atenuação que o Si desenvolveu, fazendo com que a planta obtivesse menos danos no metabolismo fotossintético.

A deficiência de Mg nas plantas prejudica seu papel biológico na ativação enzimática e na composição química da clorofila (Prado, 2008), explicando a diminuição dos danos em plantas cultivadas na presença do Si. O uso do Si também contribui para diminuir o estresse provocado pela deficiência de Mg, por diminuir a degradação oxidativa de clorofilas (Xie et al., 2014), aumentando as taxas fotossintéticas (Zuccarini, 2008; Chen et al., 2016), colaborando para o aumento da eficiência de uso do Mg e sua conversão em massa seca (Hosseini et al., 2019).

No diâmetro do caule, as plantas sob omissão do Mg apresentaram diminuição de 20% e 26,6% na ausência e presença do Si, respectivamente, comparando com as cultivadas em SC (Figura 4). Para a altura das plantas, observou-se diminuição de 27,5% e 22,5% na ausência e presença do Si, respectivamente, em relação a SC (Figura 5). Os danos no crescimento das plantas causados pela deficiência de Mg devem-se ao seu papel no metabolismo fotossintético, síntese proteica, formação de clorofila, carregamento do floema e utilização de fotoassimilados (Martins, 2019). Além disso, o Mg atua como ativador de muitas enzimas, incluindo aquelas relacionadas ao metabolismo energético (Lima, 2014).

A deficiência de Mg diminuiu a massa seca da parte aérea em 24%, em relação as plantas sob SC (-Si), no entanto, o fornecimento de Si não proporcionou ganho relevante (Figura 6). A massa seca das raízes também foi diminuída com a omissão do Mg, com decréscimo de até 40% e 45% na ausência e presença do Si respectivamente, comparado a SC, a presença de Si também não foi suficiente para diminuir os danos causados nesta variável (Figura 7).

Na massa seca da planta inteira observa-se que após a omissão do N e do Ca, a omissão do Mg foi a que mais provocou danos severos a planta, sendo 26% e 30% menor na ausência e presença do Si, respectivamente, em relação a SC (Figura 8). Os resultados evidenciam que o fornecimento de Si não foi capaz de mitigar os danos causados pela deficiência de Mg, demonstrando que plantas de sorgo possuem alta demanda por esse nutriente.

6.6 Enxofre (S)

A omissão de S com presença de Si aumentou o acúmulo de Si na parte aérea, sendo 10% maior aos observados em plantas sob SC (Figura 1). Já o acúmulo de Si

nas raízes em plantas sob omissão do S na presença do Si foi semelhante ao observado quando cultivadas sob SC (Figura 2).

No entanto, a deficiência de S causou diminuição da eficiência do PSII mas o fornecimento de Si diminuiu os danos causados no rendimento fotossintético (Figura 3). Isso justifica-se pelo fato de o S atuar em nos processos metabólicos da fotossíntese e participar da constituição de coenzimas ligadas ao metabolismo fotossintético, como a ferredoxina (Vieira, 2018).

Para o diâmetro do caule não foi observado efeito na deficiência de S e do fornecimento de Si (Figura 4). Os danos causados pela omissão do S na altura das plantas também não demonstraram efeito da omissão e do Si (Figura 5). É possível que a fase inicial de desenvolvimento das plantas de sorgo não seja a mais representativa para demonstrar os danos causados pela deficiência de S, bem como, o efeito mitigador do Si em plantas sob essas condições (Sfredo, 2004).

O menor efeito no crescimento das plantas refletiu na produção de massa seca, sendo que S foi o nutriente que causou menores danos na massa seca da parte aérea (Figura 6). Assim como na parte aérea, a omissão de S não causou diminuição na massa seca das raízes (Figura 7). Esses resultados indicam que não há grandes limitações causadas pela deficiência de S no desenvolvimento inicial de plantas de sorgo. França (1985) indica que a omissão do S induz aumento no desenvolvimento inicial das plantas e que a sua deficiência começa a aparecer em geral na sexta semana nas gramíneas, considerando que as plantas deste estudo foram analisadas 38 dias após a semeadura, é possível que não tenham tido sintomas ainda neste período.

De maneira semelhante ao observado para a massa seca da parte aérea e das raízes, a massa seca da planta inteira também não foi diminuída por essa deficiência nutricional (Figura 8). A omissão de S foi o nutriente que menos limitou a produção da planta, resultados semelhantes encontram no trabalho de Viégas et al. (2007) e Prado et al. (2008), que afirmam que plantas de sorgo sob deficiência de S tiveram diminuição significativa apenas no número de folhas quando comparado com ao tratamento completo, sem omissão de nutrientes, o que não foi capaz de provocar efeito negativo na produção de massa seca das plantas.

7. CONCLUSÃO

Os nutrientes que mais limitaram a produção de massa seca em plantas na fase inicial de desenvolvimento de plantas de sorgo cultivadas na ausência de silício foram o nitrogênio e o cálcio. No entanto, o fornecimento de silício na solução de cultivo foi eficiente para mitigar os danos causados pela deficiência nutricional apenas de fósforo e cálcio.

REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, F.; TUBANA, B. S.; MARTINS, M. S.; DATNOFF, L. E. Effect of different silicon sources on yield and silicon uptake of rice grown under varying phosphorus rates. **Plants**, v. 6, n. 3, p. 35, 2017.

ALMEIDA, L. H. C. de.; KLEIN, P. H.; de OLIVEIRA, E. C.; MIGLIORANZA, E. Silício e disponibilidade de fósforo no crescimento e desenvolvimento de mudas de café. **Revista Cultura Agronômica**, v. 26, n. 2, p. 123-131, 2017. Disponível em: <<https://ojs.unesp.br/index.php/rculturaagronomica/article/view/2388>>. Acesso em 05 mar 2021.

BORGES, I. D.; FRANCO, A. A. N.; KONDO, M. K.; MARTINS, D. C.; TEIXEIRA, E. C.; MOREIRA, S. G. Acúmulo de macronutrientes na cultura do sorgo granífero na safrinha. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 15, n. 2, p. 294-304, 2016. Disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=BR2018700116>. Acesso em: 9 ago. 2020.

BUCHELT, A. C. Silício na mitigação de deficiência nutricional e formas de aplicação via fertirrigação e foliar em plantas forrageiras. In: **Silício na mitigação de deficiência nutricionais**, Jaboticabal, v. 1, n. 1, p. 1-86, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/183554/buchelt_ac_dr_jabo.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em: 7 ago. 2020.

CURVÊLO, C. R. D. S.; RODRIGUES, F. Á.; SILVA, L. D. C.; NASCIMENTO, K. J. T.; BERGER, P. G. Mecanismos bioquímicos da defesa do algodoeiro à mancha de ramulária mediados pelo silício. **Bragantia**, v. 72, n. 1, p. 41-51, 2013. Disponível em: https://www.scielo.br/pdf/brag/v72n1/aop_1900_13.pdf. Acesso em: 10 abr. 2020.

CARVALHO, F. F. **Eficiência potencial do uso do nitrogênio e fósforo na fotossíntese ao longo de um gradiente de perturbação antrópica da Mata Atlântica**. 2017. 76f. Dissertação (Mestrado em biodiversidade vegetal e meio ambiente) – Instituto de Botânica da Secretaria do Meio Ambiente, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/pgibt/2018/03/fabio_fernandes_ms.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2021.

CAVALCANTE, A. M. de L. N. **Interferência de doses crescentes de silício na absorção de nutrientes e na matéria seca de *Brachiaria decumbens* Stapf**. 2013. 45f. Dissertação (Mestrado em agronomia tropical) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013. Disponível em: <<https://tede.ufam.edu.br/bitstream/tede/4241/2/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20->

[%20Ana%20Marta%20de%20Lima%20Nunes%20Cavalcante.pdf](#)>. Acesso em: 06 fev. 2021.

CIOMPI, S.; GENTILI, E.; GUIDI, L.; SOLDATINI, G. F. The effect of nitrogen deficiency on leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in sunflower. **Plant Science**, v. 118, n. 2, p. 177-184, 1996.

COELHO, A. M. POSTAL, Sorgo Cx; LAGOAS – MG, sete. Manejo da fertilidade do solo, exigências nutricionais e adubação do sorgo granífero cultivado na safrinha. 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/272173385 MANEJO DA FERTILIDADE DO SOLO EXIGENCIAS NUTRICIONAIS E ADUBACAO DO SORGO GRANIFERO CULTIVADO NA SAFRINHA](https://www.researchgate.net/publication/272173385_MANEJO_DA_FERTILIDADE_DO_SOLO_EXIGENCIAS_NUTRICIONAIS_E_ADUBACAO_DO_SORGO_GRANIFERO_CULTIVADO_NA_SAFRINHA)>. Acesso em: 10 ago. 2020.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. **Elementos requeridos à nutrição de plantas**. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2007. p. 91-107.

COSTA, R. V. da; CASELA, C. R.; ZAMBOLIM, L.; dos SANTOS, F. G.; FERREIRA, A. D. S. (2008). Controle genético da resistência do sorgo à antragnose foliar (*Colletotrichum sublineolum*). **Embrapa Milho e Sorgo-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2008.

CRUZI, J.; PELACANI, C. R.; CARVALHO, J. E. B. D.; SOUZA FILHO, L. F. D. S.; QUEIROZ, D. C. Níveis de nitrogênio e a taxa fotossintética do mamoeiro "golden". **Ciência Rural**, v. 37, n. 1, p. 64-71, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/cr/v37n1/a11v37n1.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2021.

CHEN, D.; CAO, B.; QI, L.; YIN, L.; WANG, S.; DENG, X. Silicon-moderated K-deficiency-induced leaf chlorosis by decreasing putrescine accumulation in sorghum. **Annals of botany**, v. 118, n. 2, p. 305-315, 2016.

EMBRAPA. **Importância do sorgo**. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/486642/1/Doc26.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2020.

EPSTEIN, E. Silicon in plants: facts vs concepts. In: **Studies in Plant Science**. Elsevier, 2001, p.1-15.

FONSECA, I. M.; PRADO, R. D.; ALVES, A. U.; GONDIM, A. R. O. Crescimento e nutrição do sorgo (cv. BRS 304) em solução nutritiva. **Revista de Biologia e Ciências**

da Terra, v. 8, n. 2, p. 113-124, 2008. Disponível em: <http://www.nutricaoeplantas.agr.br/site/downloads/unesp_jaboticabal/omissao_sor_go3.pdf>. Acesso em: 1 mar. 2021.

FREITAS, L. C.; COSTA FILHO, J. F. da; ALOISI, R. R.; MELO, W. J. Contribuição ao estudo da sílica solúvel em alguns perfis de solos. **Científica**, Jaboticabal, v. 5, n. 2, p. 296-305, 1977.

GOMES F. B.; MORAES J. C.; SANTOS C. D.; GOUSSAIN, M. M. Resistance induction in wheat plants by silicon and aphids. **Scientia Agricola**, v. 62, n. 6, p. 547-551, 2005.

JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils, plants, and animals. In: **Advances in Agronomy**. Academic Press, 1967. p. 107-149.
KOZLOWSKI, T. T; PALLARDY, G. S. **Physiology of woody plants**. Elsevier, 1996. 411p.

KORNDÖRFER, G. H.; COELHO, N. M.; SNYDER, G. H.; MIZUTANI, C. T. Avaliação de métodos de extração de silício para solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p.101-106, 1999.

LIMA FILHO, O. F. **História do uso do silicato de sódio na agricultura**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2009.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants. **Studies in plant Science**, v. 8, p. 17-39, 2001.

MALAVOLTA, E. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Eurípedes Malavolta, Godofredo Cesar Vitti, Sebastião Alberto de Oliveira – 2. ed. **Piracicaba: Potafos**, 1997. 319 p.

MENDONÇA, A. O. de; TAVARES, L. C.; BRUNES, A. P.; MONZÓN, D. L. R.; VILLELA, F. A. Acúmulo de silício e compostos fenólicos na parte aérea de plantas de trigo após a adubação silicatada. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 5, 2013. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/22432/13010>. Acesso em: 01 fev. 2021.

MENEGALE, M. L. de C.; CASTRO, G. S. A.; MANCUSO, M. A. C. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Embrapa Amapá-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2015. Disponível em:

<<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1025188/1/CPAFAP2015Siliciointeracaocomosistemasoloplanta.pdf>> Acesso em: 12 ago. 2020.

MELO, S. P. **Silício e fósforo para estabelecimento do capim-marandu num latossolo vermelho-amarelo**. 2005. 110f. Tese (Doutorado em agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-05072005-143221/publico/SuzanaMelo.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

SOUZA, C. R. W. O de; TEIXEIRA, G. C. M.; BARRETO, R. F.; CAMPOS, C. N. S.; LEAL, A. J. F.; TEODORO, P. E.; PRADO, R. de M. Macronutrient deficiency in snap bean considering physiological, nutritional, and growth aspects. **Plos one**, v. 15, n. 6, p. e0234512, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234512> . Acesso em: 13 ago. 2020.

OLIVEIRA, L. A. de; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, A. C. Acumulação de silício em arroz em diferentes condições de pH da rizosfera. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 685-690, 2007.

PRADO, R. de M.; FERNANDES, F. M. Resposta da cana-de-açúcar à aplicação da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 199-207, 2001.

RIBAS, P. M. (2003). Sorgo: Introdução e Importância Econômica. **Embrapa Milho e Sorgo-Documents (INFOTECA-E)**, 2003. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/486642/1/Doc26.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2021.

SANTOS, G. R.; de CASTRO NETO, M. D.; CARVALHO, A. R. S.; FIDELIS, R. R.; AFFÉRI, F. S. Fontes e doses de silício da severidade do cretamento gomoso e produtividade da melancia. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 2, p. 266-272, 2010.

SOUZA JÚNIOR, S. F. de; ANDRADE, A. L. de; ALMEIDA, P. S. G.; MARCÍLIO, H. C.; FOLMAN, R.; BEZERRA, F. F.; VILALBA, R.; SCHERER, S. Acúmulo de silício em folhas de bananeira (*Musa sp.*). In: **54 Congresso Brasileiro de Fruticultura, 20 e Annual Meeting of the Interamerican Society for Tropical Horticulture**. Vitória: SBF, 2010.

SINGH, S. P.; COOPER, J. E.; FISHER, H. L.; TARRANT, C. J.; LLOYD, T.; BANJO, J.; CORFE, S.; JONES, C. Determining the chronology and components of psychosis onset: The Nottingham Onset Schedule (NOS). **Schizophrenia Research**, v. 80, n. 1, p. 117-130, 2005.

SUGIHARTO, B.; MIYATA, K.; NAKAMOTO, H.; SASAKAWA, H.; SUGIYAMA, T. Regulation of expression of carbon-assimilating enzymes by nitrogen in maize leaf. **Plant Physiology**, v. 92, n. 4, p. 963-969, 1990.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. **Sci. Rice Plant**, v. 2, p. 58-71, 1995.

TATAGIBA, S. D.; PELOSO, A. de F.; RODRIGUES, F. Á. O silício potencializa o desempenho fotoquímico em folhas de arroz. **Revista Univap**, v. 22, n. 40, p. 750, 2017. Disponível em: http://cronos.univap.br/cd/INIC_2016/anais/arquivos/RE_0182_0036_02.pdf. Acesso em: 02 fev. 2021.

TEIXEIRA, G. C. M.; ROCHA, A. M. S.; OLIVEIRA, K. S.; dos SANTOS, S. M. M.; de OLIVEIRA FILHO, A. S. B.; PRADO, R. de M.; PALARETTI, L. F. Silício na mitigação dos estresses por deficiência de manganês e pelo déficit hídrico em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. **Científica**, v. 48, n. 2, p. 170-187, 2020. Disponível em: <http://cientifica.org.br/index.php/cientifica/article/view/1308>. Acesso em: 13 ago. 2020.

TEIXEIRA, I. R.; SILVA, R. P.; SILVA, A. G.; KORNDÖRFER, P. H. Fontes de silício em cultivares de feijão nas safras das águas e da seca. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 04, p. 562-568, 2008.

TISDALE, S. L.; BEATON, J. D.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers**. 4.ed. New York: Mac Millan, 1985. 754p.

RAIJ, B. V.; CAMARGO, O. A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, v. 32, n. UNICO, p. 223-236, 1973. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/brag/v32nunico/11.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2021.

YANG, H.; YANG, J.; LV, Y.; HE, J. SPAD values and nitrogen nutrition index for the evaluation of rice nitrogen status. **Plant Production Science**, v. 17, n. 1 p. 81-92, 2014. Disponível em: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/pps/17/1/17_81/article-char/ja/> Acesso em 05 jan 2021.

ZANUTTO, R. P.; VAREIRO, W. P.; LIMA FILHO, O. F. de. Estudo da relação molar de macronutrientes catiônicos em solução nutritiva para sorgo-sacarino. **Embrapa Agropecuária Oeste-Outras publicações técnicas (INFOTECA-E)**, 2016.

Disponível em: <<https://www.cpao.embrapa.br/cds/jipe2016/PDF/17.pdf> > Acesso em 08 fev 2021.

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; FONTES, R. L. F.; AVILA, V. T. Aplicação do silício para aumentar a resistência do arroz à mancha-parda. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 2, p. 203-206. Disponível em: <<https://www.cpao.embrapa.br/cds/jipe2016/PDF/17.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2021.