

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

**FONTES E CONCENTRAÇÕES DE SILÍCIO FOLIAR NA  
PRODUÇÃO E NA QUALIDADE DA ACELGA E DA COUVE**

**José Zenóbio de Souza**

Engenheiro Agrônomo

2018

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

**FONTES E CONCENTRAÇÕES DE SILÍCIO FOLIAR NA  
PRODUÇÃO E NA QUALIDADE DA ACELGA E DA COUVE**

**José Zenóbio de Souza**

**Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado**

**Coorientadora: Profa. Dra. Sylvia Letícia Oliveira Silva**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal).

**2018**

Zenóbio, José de Souza  
Z55f Fontes e concentrações de silício foliar na produção e na qualidade da acelga e da couve / José Zenóbio de Souza. -- Jaboticabal, 2018  
xiv, 26 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018  
Orientador: Renato de Mello Prado  
Coorientadora: Sylvia Leticia Oliveira Silva  
Banca examinadora: Fábio Olivieri de Nobile; Gilmara Pereira da Silva  
Bibliografia

1. Biofortificação. 2. *Beta vulgaris* var. *cicla*. 3. *Brassica oleracea* var. *acephala*. 4. Elemento benéfico. 5. Estresse abiótico. 6. Silicato de potássio. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.811

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –  
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: FONTES E CONCENTRAÇÕES DE SILÍCIO FOLIAR NA PRODUÇÃO E NA QUALIDADE DA ACELGA E DA COUVE

**AUTOR: JOSÉ ZENÓBIO DE SOUZA**

**ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO**

**COORIENTADORA: SYLVIA LETICIA OLIVEIRA SILVA**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO  
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. FÁBIO OLIVIERI DE NOBÍLE  
Centro Universitário da Fundação Educacional / UNIFEB / Barretos/SP

Pós-doutoranda GILMARA PEREIRA DA SILVA  
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 16 de março de 2018

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**JOSÉ ZENÓBIO DE SOUZA** – filho de Josefa Maciel de Souza, nascido no dia 05 de outubro de 1958 em Cerro Corá – RN, Brasil. Concluiu o curso Técnico em Agropecuária em 1978, ingressando através de concurso público na Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do Maranhão – EMATER-MA, em 1979, como Extensionista Rural, onde trabalhou por 20 anos, prestando assistência técnica a produtores rurais. Em 1993, concluiu o curso de Tecnólogo em Administração Rural na Universidade Estadual do Maranhão – UEMA; em 1999, concluiu o curso de Agronomia na UEMA; e em 2000, concluiu o curso de Especialização em Agricultura Tropical pela Universidade Federal Rural de Pernambuco. No período de 1999 a 2004, ficou à disposição da UEMA, exercendo atividades na Fazenda-Escola. Em 2004, através de concurso público, ingressou na Escola Agrotécnica Federal de São Luís, hoje Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Câmpus São Luís Maracaná, na cidade de São Luís, sendo lotado na Coordenação Geral de Produção e Pesquisa – CGPP, desenvolvendo atividades na Fazenda-Escola. Em 2010, por meio de concurso público, ingressou na carreira de Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico do IFMA – Câmpus São Luís Maracaná, permanecendo até os dias atuais. Em agosto de 2016, ingressou no Programa de Mestrado Interinstitucional objeto do convênio firmado entre o IFMA/UNESP de Jaboticabal, para oferta de Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal), sob orientação do Prof. Dr. Renato de Mello Prado (FCAV/UNESP) e coorientação da Profa. Dra. Sylvia Letícia Oliveira Silva (IFMA).

**CARGOS ASSUMIDOS:** Chefe do Escritório Local da EMATER-MA, do município de Altamira do Maranhão-MA, no período de 1979 a 2005; Chefe do Escritório Local da EMATER-MA, do município de São Luís Gonzaga do Maranhão-MA, no período de 1986 a 1988; Assessor de projetos e produção durante o período de 2004 a 2008 da CGPP da Escola Agrotécnica Federal de São Luís-MA; Coordenador Geral de Produção e Pesquisa da Escola Agrotécnica Federal de São Luís-MA, no período de 2009 a 2010, Chefe do Departamento de Produção e Projetos do IFMA – Câmpus São Luís Maracaná, a partir de 2010 até os dias atuais. A partir de 2012 até a presente data, é Diretor Geral Substituto do Câmpus do IFMA – São Luís Maracaná.

*“Evoluir é compreender que a distância entre os sonhos e a realidade é apenas a sua força de vontade”.*

**Diogo Lemos**

À minha mãe Josefa Maciel de Souza, à  
minha esposa Lucira de Sales Fortes e aos  
meus filhos Igor Ruggeri F. de Souza, Petrus  
Hermann F. de Souza e Thales Aymar F. de  
Souza.

***Dedico.***

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela vida e por estar presente em todos os momentos de minha existência, possibilitando-me mais esta conquista.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão e à Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Jaboticabal, pelo convênio firmado para a oferta do Mestrado interinstitucional em Agronomia/Produção Vegetal.

No geral, agradeço à Profa. Dra. Lucimeire Amorim Castro, Diretora Geral do IFMA/Câmpus São Luís Maracanã que envidou todos os esforços para realização deste MINTER em convênio com o programa de Pós-Graduação em Agronomia/Produção Vegetal e a FCAV/UNESP, Câmpus de Jaboticabal-SP; e especialmente pela confiança em mim depositada através de designações para assumir diversas funções, tanto na gestão da extinta Escola Agrotécnica Federal de São Luís, quanto na gestão do Câmpus do IFMA/São Luís Maracanã; pelo incentivo e apoio para realização desse Mestrado.

Ao Professor Dr. Renato de Mello Prado, pelas orientações repassadas em todas as etapas do Mestrado, sempre com atenção, cordialidade, presteza e principalmente com muita paciência.

À professora do IFMA Dra. Sylvia Leticia de Oliveira Silva, pela coorientação, especialmente durante a condução da pesquisa.

Ao Engenheiro Agrônomo do Câmpus São Luís Maracanã, Dr. Thiago Palhares Farias, que muito contribui desde o início da realização do Mestrado.

Ao Professor Arthur Bernardes Cecílio Filho, que tão bem vem coordenando este MINTER, sempre atencioso e sensível aos nossos pleitos.

À professora do IFMA/Câmpus São Luís Maracanã, Dra. Sandra Cruz, Coordenadora local do MINTER.

Ao Professor Vitório Barato Neto, pela realização da revisão de português no texto desta dissertação.

Aos colegas da turma do MINTER, especialmente a Júlio Garcia Neto, pelas contribuições e ajudas desde o início dessa jornada.

Aos trabalhadores terceirizados, José Arias, Ednilson, Roque, Fernando e Fernanda, pelas ajudas prestadas durante a condução do experimento.

Aos colegas do Departamento de Produção, em especial, Diogo, Renault, Anísio, Edvan, Leidiana, Deusur, e aos demais colegas de trabalho pelo apoio e torcida.

Aos membros do GENPLANT, que tão bem nos receberam e, principalmente, a Jonas Júnior pelas contribuições e ajudas nas análises de laboratório e pela submissão do artigo a revista.

Finalmente a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste sonho que já estava adormecido; que Deus me ilumine para que eu possa retribuir todo esse apoio e incentivo recebidos, sendo um profissional melhor em minhas atividades.

**SUMÁRIO**

	<b>Página</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>3</b>
2.1 Importância da acelga e da couve .....	3
2.2 Silício nas plantas .....	5
2.3 Silício na saúde humana e na biofortificação .....	6
2.4 Nutrição foliar de silício na produção de hortaliças .....	7
2.5 Nutrição foliar de silício na qualidade pós-colheita de hortaliças .....	8
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>10</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>21</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>22</b>

## FONTES E CONCENTRAÇÕES DE SILÍCIO FOLIAR NA PRODUÇÃO E NA QUALIDADE DA ACELGA E DA COUVE

**RESUMO** – O silício (Si) é um elemento benéfico para as plantas que pode incrementar seu crescimento em condições de estresse e ainda refletir na qualidade, mas cujos efeitos não são conhecidos com a aplicação foliar do elemento na acelga e na couve, objetivou-se avaliar fontes e concentrações de Si via foliar na produção e na qualidade da acelga e da couve. Realizaram-se dois experimentos em casa de vegetação com acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*), cultivar verde-escuro, e com couve (*Brassica oleracea* L var. *acephala*), cultivar manteiga-da-geórgia, em sistema de cultivo hidropônico, em vasos com areia contendo uma planta, cultivadas com a média da temperatura máxima de  $43,1\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Os experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizados, com oito tratamentos e quatro repetições, em esquema fatorial  $2 \times 4$ , sendo duas fontes de Si, silicato de potássio (Si =  $128\text{ g L}^{-1}$ ;  $\text{K}_2\text{O} = 126,5\text{ g L}^{-1}$ ) e silicato de potássio e sódio estabilizado (Si =  $115\text{ g L}^{-1}$ ;  $\text{K}_2\text{O} = 19\text{ g L}^{-1}$ ), e quatro concentrações (0,00; 0,84; 1,68 e  $2,52\text{ g L}^{-1}$ ) de Si. Realizaram-se três pulverizações foliares a cada 10 dias, iniciando aos 20 dias após o transplante (DAT). As plantas de acelga e de couve foram colhidas aos 48 e 54 (DAT), respectivamente. Avaliaram-se a altura das plantas, a massa da matéria fresca, o teor de vitamina C (Ascorbato), a perda de água durante o armazenamento, massa da matéria seca, o teor e o acúmulo de Si nas folhas. A aplicação de Si foliar é viável para hortaliças folhosas de acelga e couve, pois incrementou o teor e o acúmulo do elemento, o crescimento, a produção, e melhorou a qualidade, inclusive a biofortificação, destacando-se a concentração de Si foliar de  $2,52\text{ g L}^{-1}$  na forma de silicato de potássio.

**Palavras-chave:** biofortificação, *Beta vulgaris* var. *cicla*, *Brassica oleracea* var. *acephala*, elemento benéfico, estresse abiótico, silicato de potássio

## SILICON LEAF FERTILIZATION CONCENTRATION AND SOURCES IN THE PRODUCTION AND QUALITY OF CHARD AND KALE

**ABSTRACT** – Silicon (Si) is a beneficial element for plants. Its usage can increase plant growth under stressful conditions and still improve plant quality, but these effects are still unknown with foliar application of the element in chard and kale. This aim of this study was to evaluate sources and concentrations of Si leaf fertilization on the production and quality of chard and kale. Two experiments were carried out in a greenhouse with chard (*Beta vulgaris* var. *cicla*), “verde-escura” cultivar and kale (*Brassica oleracea* L var. *acephala*), “manteiga-da-geórgia” cultivar using a hydroponic culture system in pots filled with sand containing one plant each, grown under the mean maximum temperature of  $43.1\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The experiments were carried out under a completely randomized design with eight treatments and four replications in a 2 x 4 factorial scheme and two sources of silicon: potassium silicate (Si =  $128\text{ g L}^{-1}$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 126.5\text{ g L}^{-1}$ ) and (Si =  $115\text{ g L}^{-1}$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 19.0\text{ g L}^{-1}$ ) and four concentrations (0.00; 0.84; 1.68 and  $2.52\text{ g L}^{-1}$ ). We performed three leaf sprays every 10 days, starting at 20 days after transplanting (DAT). The chard and kale plants were harvested at 48 and 54 (DAT), respectively. We evaluated plant height, fresh matter mass, vitamin C content (Ascorbate), water loss during storage, dry matter mass, Si content, and Si accumulation in the leaves. Si leaf fertilization is viable for leafy vegetables as chard and kale, because this fertilization increased the content and the accumulation of Si, growth, production, and also improved the quality, including the biofortification, where the Si leaf concentration of  $2.52\text{ g L}^{-1}$  as potassium silicate was highlighted.

**Keywords:** biofortification, *Beta vulgaris* var. *cicla*, *Brassica oleracea* var. *acephala*, beneficial elemento, abiotic stress, potassium silicate

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1.</b> Temperaturas e umidade relativa do ar durante o período experimental (junho/2017 a agosto/2017), no interior da casa de vegetação. ....	<b>10</b>
<b>Figura 2.</b> Acúmulo de Si na acelga (a) e na couve (b), em função das concentrações (C) de Si via foliar, nas fontes (F) de silicato de potássio (SiK) e silicato de potássio e sódio estabilizado (SiNaK). ** e *: Significativo a 1 e a 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. Letras iguais são semelhantes pelo teste t-Student, a 5% de probabilidade. ....	<b>13</b>
<b>Figura 3.</b> Altura da planta da acelga (a) e da couve (b), em função das concentrações (C) de Si via foliar nas fontes (F) de silicato de potássio (SiK) e silicato de potássio e sódio estabilizado (SiNaK). <sup>ns</sup> e **: Não significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. Letras iguais são semelhantes pelo teste t-Student, a 5% de probabilidade. ....	<b>14</b>
<b>Figura 4.</b> Massa da matéria fresca da acelga (a) e da couve (b), em função das concentrações (C) de Si via foliar, nas fontes (F) de silicato de potássio (SiK) e silicato de potássio e sódio estabilizado (SiNaK). **: Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F. Letras iguais são semelhantes, pelo teste t-Student, a 5% de probabilidade. ....	<b>15</b>
<b>Figura 5.</b> Massa da matéria seca da acelga (a) e da couve (b), em função das concentrações (C) de Si via foliar, nas fontes (F) de silicato de potássio (SiK) e silicato de potássio e sódio estabilizado (SiNaK). <sup>ns</sup> e **: Não significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. Letras iguais são semelhantes pelo teste t-Student, a 5% de probabilidade. ....	<b>16</b>
<b>Figura 6.</b> Teor de Si nas folhas de acelga (a) e na couve (b), em função das concentrações (C) de Si via foliar, nas fontes (F) de silicato de potássio (SiK) e silicato de potássio e sódio estabilizado (SiNaK). <sup>ns</sup> e **: Não significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. Letras iguais são semelhantes pelo teste t-Student, a 5% de probabilidade. ....	<b>17</b>

**Figura 7.** Teor de ascorbato (Vitamina C) das folhas de acelga (a) e da couve (b), em função das concentrações (C) de Si via foliar, nas fontes (F) de silicato de potássio (SiK) e silicato de potássio e sódio estabilizado (SiNaK). <sup>ns</sup> e <sup>\*\*</sup>: Não significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. Letras iguais são semelhantes pelo teste t-Student, a 5% de probabilidade. .... 19

**Figura 8.** Perda de água da acelga (a) e da couve (b) durante os dias de armazenamento (D), em função dos tratamentos (T), fontes, silicato de potássio (SiK) e silicato de potássio e sódio estabilizado (SiNaK), na concentração 2,52 g L<sup>-1</sup> de Si e controle, sem Si. <sup>ns</sup> e <sup>\*\*</sup>: Não significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. Letras iguais são semelhantes pelo teste t-Student, a 5% de probabilidade. .... 20

## 1 INTRODUÇÃO

A biofortificação agronômica é uma estratégia que pode ser utilizada para aumentar a concentração de nutrientes nos produtos agrícolas e para melhorar a dieta e a saúde humana. No entanto, para obter produtos agrícolas mais nutritivos, de forma técnico-econômica sustentável, é necessário conciliar a biofortificação genética à biofortificação agronômica. O Si é o terceiro elemento essencial mais presente no corpo humano, após o ferro e o zinco (REIS et al., 2007), portanto é fundamental que, na dieta alimentar, contenha quantidade adequada de Si estimada em 25 mg por dia (NIELSEN, 2014). Este elemento desempenha papel importante na saúde humana, regula o metabolismo de vários tecidos, particularmente os ossos e as cartilagens e no tecido conjuntivo, incrementando a síntese de colágeno tipo 1, e a atividade da enzima prolina hidroxilase, e neutraliza os radicais livres (JUGDAOHSINGH, 2007).

O Si é predominantemente encontrado em alimentos de origem vegetal, ricos em fibras, sendo que a ingestão de Si abaixo da dieta recomendada pode causar deficiências no organismo humano. Uma alternativa para aumentar a concentração do elemento nos vegetais pode ser a biofortificação agronômica, sendo essa técnica justificável em alimentos de consumo universal, como as hortaliças folhosas. Devido ao seu baixo custo, esses alimentos poderiam beneficiar toda população, inclusive a de baixo poder aquisitivo. Ocorre que essas espécies são classificadas como plantas não acumuladoras de Si, pois apresentam teor de Si inferior a 0,5% (MARSCHNER, 1995). Para resolver essa questão, é importante a biofortificação com Si, porém as hortaliças folhosas apresentam baixa absorção radicular de Si, tornando-se importante a estratégia de fornecimento do elemento via foliar.

A aplicação do Si via foliar apresentou viabilidade para a biofortificação em hortaliças folhosas, a exemplo da alface (RESENDE et al., 2005) e da rúcula (GUERRERO; BORGES; FERNANDES, 2011), melhorando inclusive a qualidade, mas não foram encontrados relatos em acelga e couve.

Para aumentar o teor de Si foliar nestas hortaliças, é importante conhecer a melhor fonte e concentração do elemento na calda de pulverização. As fontes solúveis de Si utilizadas na nutrição são o silicato de potássio e o silicato de sódio, sendo mais empregada a primeira fonte sem acréscimo de estabilizante. Uma fonte alternativa de

Si será a mistura do silicato de sódio e do silicato de potássio associado com estabilizante. O estabilizante à base de sorbitol pode diminuir as reações de polimerização do Si na calda. No entanto, essa fonte contém sódio em concentrações baixas (teor de NaO inferior a 2%), mas dependendo da espécie pode beneficiar ou não o crescimento da planta.

Diante do exposto, tem-se a hipótese de que a aplicação foliar de Si na acelga e na couve pode ser viável por beneficiar a produção e a qualidade, inclusive a biofortificação, dependendo da fonte e da concentração do elemento na calda de pulverização. Portanto, objetivou-se avaliar fontes e concentrações de Si foliar na produção e na qualidade, especialmente a biofortificação, da acelga e da couve sob alta temperatura.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Importância da acelga e da couve

As hortaliças são plantas herbáceas, geralmente de ciclo curto e de tratos culturais intensivos, cujas partes comestíveis são diretamente utilizadas na alimentação humana, ou seja, *in natura* ou com pouco processamento. Fornecem folhas, hastes, flores, frutos, raízes e outras partes que são utilizadas na alimentação, cruas ou cozidas. As hortaliças complementam a alimentação básica, pois são importantes fontes de vitaminas, sais minerais e fibras, além de apresentarem valor medicinal (AMARO et al., 2007).

A acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*) pertence à família das Quenopodiáceas, é similar à beterraba, mas diferencia-se desta pelo ótimo desenvolvimento das folhas, mais largas e numerosas, que apresentam nervuras bem destacadas. Os pecíolos são carnosos, constituindo, com as folhas, a parte comestível. A planta apresenta sistema radicular mais ramificado (FILGUEIRA, 2007).

Trata-se de uma cultura de origem europeia, de clima ameno ou frio, 15 a 25 °C (VIEIRA, 2010), sendo tolerante a baixas temperaturas. Contudo, também pode ser cultivada em temperaturas mais elevadas. No Centro-Sul do Brasil, planta-se acelga ao longo do ano, em numerosas regiões mais altas, com verão suave; em regiões de baixa altitude, planta-se apenas durante o outono-inverno. Em âmbito mundial e no Brasil, é restrito a cultivares de acelga verdadeira, possivelmente devido à pouca pesquisa por parte dos fitomelhoristas (FILGUEIRA, 2007).

A couve (*Brassica oleracea* var. *acephala*) pertence à família Brassicácea, é uma hortaliça arbustiva anual ou bienal, é uma cultura típica de outono-inverno, bem adaptada ao frio intenso. No verão, desenvolve-se bem em áreas serranas, com altitude acima de 800 m. A produção da couve é melhor quando as temperaturas médias mensais se situam entre 16 e 22 °C, com temperaturas mínimas de 5 a 10 °C e temperaturas máximas de 28 °C (TRANI et al., 2015). Na ocorrência de temperaturas acima desse valor, poderá haver danos no desenvolvimento das plantas, acarretando prejuízos com relação à produção comercial.

O consumo desta hortaliça no Brasil tem gradativamente aumentado devido,

provavelmente, às novas maneiras de utilização na culinária e às recentes descobertas da ciência quanto às suas propriedades nutricionais. Comparativamente às outras hortaliças folhosas, a couve destaca-se por seu maior conteúdo de proteínas, carboidratos, fibras, cálcio, ferro, vitamina A, niacina e vitamina C (TRANI et al., 2015).

Na comercialização de hortaliças folhosas, aspectos da aparência, como tamanho, forma, brilho e a cor da folha, principalmente, são um dos principais atributos de qualidade observados pelo consumidor. O aspecto cor das folhas é de fundamental importância, pois o consumidor toma a decisão de comprar, ou não, apenas pela aparência do produto, associando a este um indicador de frescor, sem considerar a textura, o valor nutricional e o sabor (NOVO et al., 2010).

A hortaliça folhosa acelga estraga-se rapidamente quando mantida em condição ambiente, mas na geladeira, pode ser conservada por até 5 dias (VIEIRA, 2010). De acordo com Luengo e Calbo (2001), as folhas da couve desidratam-se com menos facilidade que a alface e amarelecem em apenas dois ou três dias à temperatura igual a 20 °C.

Diante das mudanças climáticas, tem ocorrido aumento da temperatura do ar ao longo dos últimos anos e com tendência de manter essa condição nos próximos anos (SILVA; PAULA, 2009). No entanto, essa condição pode prejudicar o crescimento das hortaliças acelga e couve, que preferem temperaturas amenas.

Nota-se que os maiores desafios destas hortaliças folhosas é ter ótimo crescimento nas condições ambientais de cultivo e de temperatura mais elevada, associado com produção de alta qualidade.

Diante deste cenário, o emprego da nutrição foliar de Si poderá beneficiar essas hortaliças.

## **2.2 Silício nas plantas**

O Si é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, perfazendo cerca de 27% da crosta terrestre, mas não é considerado elemento essencial para as plantas (EPSTEIN, 1999).

Em solos tropicais e subtropicais, os teores de Si são considerados baixos

devido à lixiviação e às condições atmosféricas, favorecendo o processo de intemperismo. Além disso, no mundo o cultivo intensivo remove do solo, anualmente, 210 – 224 milhões de toneladas de Si (MEENA et al., 2014).

Em cultivos hidropônicos, normalmente não é adicionado o Si, havendo baixos teores do elemento nos tecidos vegetais. O Si pode apresentar efeitos benéficos às plantas, principalmente em relação à amenização de estresses ocasionados por fatores abióticos (alta temperatura) (EPSTEIN, 1999).

O Si é um elemento benéfico que incrementa o crescimento das plantas em condições de estresse. Nos últimos anos, têm ocorrido mudanças climáticas com aumento da temperatura (SILVA; PAULA, 2009). Este fato torna-se importante em culturas que apresentam temperaturas ótimas de crescimento moderada, a exemplo da acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*) 15 a 25 °C (VIEIRA, 2010) e da couve (*Brassica oleracea* L var. *acephala*) 16 a 22 °C (TRANI et al., 2015). Diante disso, o Si pode mitigar o estresse por alta temperatura (LIANG et al., 2007; ASHRAF et al., 2010), podendo beneficiar o crescimento, a produção e a qualidade dessas culturas.

O Si é absorvido pela via radicular ou foliar na forma de ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ), concentrando-se em maior quantidade nos tecidos de suporte, do caule e nas folhas. Em plantas que apresentam baixa absorção radicular de Si, consideradas não acumuladoras de Si ( $< 0,5\% SiO_2$ ), a exemplo das hortaliças acelga e couve, a aplicação foliar do elemento pode favorecer maior acúmulo do mesmo nos tecidos foliares.

A absorção foliar ocorre depois de estabelecido o contato do elemento com a epiderme superior, inferior ou com ambas, atravessando a cutícula cerosa e as paredes das células epidérmicas por difusão, chegando à superfície externa do plasmalema, e o movimento através da membrana citoplasmática com a entrada no citoplasma, eventualmente no vacúolo depois de atravessar o tonoplasto (TAIZ et al., 2015).

O emprego do Si nas hortaliças folhosas pode alterar sua composição química a partir da biofortificação, pois elas apresentam baixo teor de Si foliar. Além disso, o Si no tecido vegetal pode prolongar a vida de prateleira ao diminuir a perda de água durante o armazenamento.

### 2.3 Silício na saúde humana e na biofortificação

Nos seres humanos, os teores mais altos de Si ocorrem em tecidos conectivos, especialmente na aorta, traqueia, tendões, ossos e pele, além de outros órgãos, como timo, suprarenais, pâncreas, fígado, coração, músculo, pulmão e baço, e em menor concentração o elemento está presente no sangue, mas não associado a proteínas (CARLISLE, 1972; SOLOMONS, 1984; SRIPANYAKORN et al., 2005).

O conteúdo elevado em tecidos conectivos deve-se, provavelmente, à ligação do Si a cadeias polissacarídicas longas e não ramificadas, denominadas de glicosaminoglicanos e a seus complexos com proteínas (SOLOMONS, 1984; CARLISLE, 1997; SRIPANYAKORN et al., 2005). Além de promover a biossíntese de colágeno e a formação e calcificação dos tecidos ósseos, o Si está envolvido no metabolismo de fosfolipídios, bem como afeta o conteúdo de cálcio no corpo, o qual está associado intimamente à idade. A deficiência de Si pode aumentar a suscetibilidade a doenças, como artrite degenerativa e arteriosclerose, bem como o envelhecimento precoce da pele e a fragilidade das unhas (LOEPER; GOY-LOEPER; ROZENSZTAJN, 1979; LAÍN, 1995; KOLESNIKOV; GINS, 2001). Como se pode notar, é importante consumir diariamente alimentos que contenham Si.

Por ser um alimento de consumo universal, as hortaliças folhosas podem ser uma das alternativas para suprir as necessidades diárias de Si na dieta humana; no entanto, estas espécies são classificadas como não acumuladoras de Si, apresentando baixo teor desse elemento, e mediante isso se faz necessária a biofortificação a partir da aplicação foliar de Si.

A população mundial continuará crescendo em ritmo acelerado por muitos anos, estimando-se que atingirá 9 bilhões de pessoas em 2050 (GODFRAY et al., 2010). Assim sendo, a demanda por alimentos também continuará crescente, sendo necessário o aumento da produção agrícola mundial, principalmente nos países em desenvolvimento (MORAES et al., 2012). Embora nos últimos anos a produção de alimentos tenha acompanhado o crescimento populacional, problemas de deficiência nutricional atingiram quase metade da população mundial (MORAES et al., 2012).

Atualmente, a maior preocupação em relação à saúde humana, principalmente nos países em desenvolvimento, são as deficiências ocasionadas pela carência de

ferro (Fe), iodo (I), selênio (Se), vitamina A e zinco (Zn), mas ainda não consta o Si; no entanto, a população está envelhecendo e com isso aumenta a possibilidade de surgirem doenças induzidas por deficiências de Si. Como prática complementar, buscando ampliar o potencial de enriquecimento dos teores de nutrientes e de vitaminas na parte comestível das culturas, vem sendo utilizada a biofortificação agrônômica. Diversas práticas podem compor a biofortificação agrônômica; entre elas, as que influenciam no aumento dos teores de Si, colaborando de forma geral na qualidade nutricional das plantas.

Nesse contexto, o uso de fertilizantes, visando a aumentar os teores de micronutrientes nas culturas, é uma das principais práticas a serem utilizadas, e pode ser realizada por meio da adubação via solo, tratamento de sementes ou aplicação foliar (WELCH, 2008).

A biofortificação agrônômica é uma intervenção nutricional específica com o objetivo de aumentar o conteúdo de micronutrientes em alimentos a partir da utilização de práticas agrônômicas e de melhoramento de plantas. Diferentemente da fortificação de alimentos, que ocorre durante o processamento, a biofortificação ocorre com o aumento de conteúdo de micronutrientes da planta.

#### **2.4 Nutrição foliar de silício na produção de hortaliças**

Os silicatos solúveis são fontes promissoras e iminentes de serem adotadas como insumos de produção, que ofereçam as vantagens da nutrição com Si, e ainda oferecem a possibilidade de serem utilizados na fertirrigação, hidroponia, via foliar e também no solo. Por serem totalmente solúveis, são capazes de fornecer Si prontamente disponível para as plantas.

O estudo da aplicação foliar de fontes de silicato solúveis está aumentando, dadas a praticidade e a possibilidade de utilização de doses relativamente baixas do elemento. Os resultados são bastante promissores em várias culturas, acumuladoras ou não de Si. Nesse cenário, destacam-se as fontes solúveis de silicato de potássio; entretanto, outras fontes de Si são encontradas no mercado, mas com solubilidade limitada, sendo indicadas apenas para aplicação no solo, especialmente o silicato de cálcio e o termofosfato yoorin (REIS et al., 2007).

Um estudo avaliou a aplicação foliar de Si na forma de silicato de sódio no acúmulo de Si nas folhas e nas variáveis de crescimento da rúcula (não acumuladora de Si) cultivada em dois solos. Os autores concluíram que o emprego do Si aumentou o teor foliar, mas não exerceu influência nas características agronômicas da rúcula (GUERRERO; BORGES; FERNANDES, 2011).

O efeito da aplicação de Si foliar na forma de silicato de sódio ( $272 \text{ g kg}^{-1} \text{ SiO}_2$ ) foi avaliado no desenvolvimento da cultura do jambu, cultivada em casa de vegetação, em dois tipos de solo. Os autores concluíram que a adubação foliar com Si proporcionou maior crescimento das plantas de jambu, no solo Latossolo Vermelho distrófico textura média, em comparação com o solo Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa e favoreceu o aumento da capacidade fotossintética das plantas de jambu no solo Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa (BORGES; GUERRERO; FERNANDES, 2010).

Um estudo com alface-americana em cultivo de verão, submetida a aplicação de concentrações de Si via foliar (0; 0,9; 1,8; 2,7 e  $3,6 \text{ kg ha}^{-1}$ ), na forma de silicato de potássio, em três épocas diferentes (14; 21 e 28 dias após o transplante), verificou aumento do rendimento da hortaliça (RESENDE; YURI; SOUZA, 2007).

## **2.5 Nutrição foliar de silício na qualidade pós-colheita de hortaliças**

A nutrição das plantas tem uma relação direta com a qualidade dos alimentos que consumimos, pois dela depende os teores de nutrientes nos alimentos. Além dos elementos essenciais às plantas, existem os elementos considerados benéficos que, mesmo não sendo classificados como essenciais, conferem efeitos positivos, melhorando várias características da planta, refletindo na produção, inclusive na qualidade pós-colheita, a exemplo do Si.

Os efeitos da aplicação foliar com Si na qualidade pós-colheita do repolho (*Brassica oleracea* var. *Capitata* L.) foram avaliados durante o armazenamento, em cinco tempos (0; 4; 8; 12 e 16 dias). Os resultados deste estudo indicaram melhorias na qualidade pós-colheita de cabeças de repolho com a aplicação de Si. Obtiveram-se maiores médias dos valores de graus Brix, maior pH, menor acidez titulável total, menor escurecimento, menor perda na cor verde e menor perda de matéria fresca

(SOUZA, 2014).

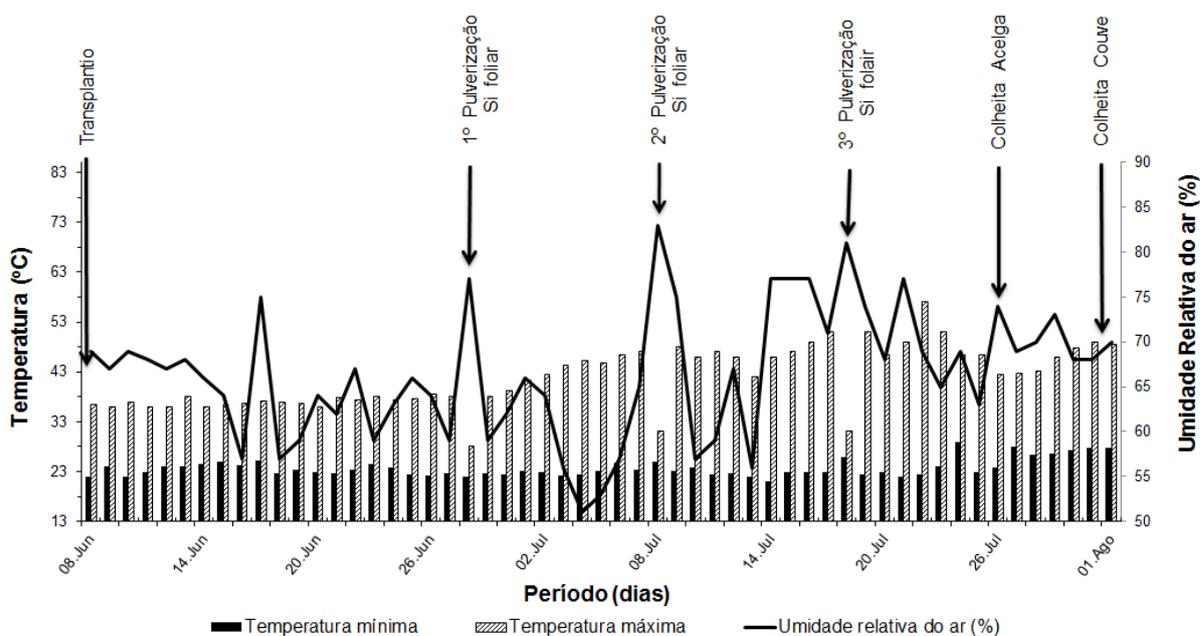
Com objetivo de avaliar a influência de doses de Si sobre a qualidade da alface-americana em cultivo de verão, foi realizado ensaio com concentrações de Si via foliar (0; 0,9; 1,8; 2,7 e 3,6 kg ha<sup>-1</sup>) em três épocas diferentes (14; 21 e 28 dias após o transplante), na forma de silicato de potássio. Os autores observaram que o Si foliar melhorou a conservação pós-colheita, aos 20 dias em câmara frigorífica a 5 ± 2 °C da alface americana em cultivo de verão (RESENDE; YURI; SOUZA, 2007).

Com objetivo de avaliar o efeito da aplicação de Si na conservação pós-colheita de alface-americana 'Lucy Brown' minimamente processada, foi realizado um estudo usando como fonte de Si o silicato de potássio na solução nutritiva nas concentrações de 0; 28; 56 e 84 mg L<sup>-1</sup>. Após o processamento, foram armazenadas em expositores, a 3 °C e 85 ± 3% de umidade relativa, por 16 dias e avaliadas a cada 4 dias (0; 4; 8; 12 e 16). Durante o período de armazenamento, os autores observaram que a concentração de 84 mg L<sup>-1</sup> de Si propiciou maior firmeza das folhas das alfaces minimamente processadas, deixando-as mais túrgidas e conservando sua vida útil por 16 dias (GALATI et al., 2015).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados dois experimentos no período de 8 de junho a 1º de agosto de 2017, em casa de vegetação, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Câmpus São Luís Maracanã, cidade de São Luís-MA, Brasil, com as culturas de acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*), cultivar verde-escura, e couve (*Brassica oleracea* var. *acephala*), cultivar manteiga-da-geórgia, em sistema de cultivo hidropônico.

Os valores de temperaturas mínimas e máximas, e umidade relativa do ar no interior da casa de vegetação, durante o período de condução dos experimentos, foram obtidos através do Termo-higrômetro (Figura 1).



**Figura 1.** Temperaturas e umidade relativa do ar durante o período experimental (junho/2017 a agosto/2017), no interior da casa de vegetação.

Observou-se variação ampla na média da temperatura máxima de  $43,1 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , durante o período experimental (Figura 1), causando estresse térmico nas plantas, tendo em vista que a temperatura ótima da acelga varia de 15 a 25  $^{\circ}\text{C}$  (VIEIRA, 2010), e da couve, de 16 a 22  $^{\circ}\text{C}$  (TRANI et al., 2015).

Nos dois experimentos, o delineamento foi inteiramente casualizado, com oito tratamentos e quatro repetições, em esquema fatorial  $2 \times 4$ , sendo duas fontes de Si,

silicato de potássio ( $\text{Si} = 128 \text{ g L}^{-1}$ ;  $\text{K}_2\text{O} = 126,5 \text{ g L}^{-1}$ ) e silicato de potássio e sódio estabilizado ( $\text{Si} = 115 \text{ g L}^{-1}$ ;  $\text{K}_2\text{O} = 19 \text{ g L}^{-1}$ ), e quatro concentrações de Si foliar (0,00; 0,84; 1,68 e  $2,52 \text{ g L}^{-1}$  de Si). As concentrações foram definidas a partir da concentração-padrão  $1,68 \text{ g L}^{-1}$  de Si. Para equilibrar o potássio nas fontes de Si, foi adicionado KCl, exceto na fonte silicato de potássio na concentração de  $2,52 \text{ g L}^{-1}$  de Si.

As mudas foram preparadas em espuma fenólica de  $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}$ , irrigadas com água deionizada até o transplântio, realizado 15 dias após a semeadura. As mudas foram transplantadas para vasos plásticos com volume de  $4 \text{ dm}^3$  (diâmetro superior: 22 cm; diâmetro inferior: 13 cm, e altura: 19 cm), preenchidos com areia média, lavada em água corrente, depois deixada submersa por 24 horas em solução de HCl, a  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , em seguida lavada em água deionizada. Conduziram-se os experimentos com uma planta por vaso, e os substratos dos vasos foram cobertos com placas de isopor para protegê-los contra a incidência direta da luz.

A partir do transplântio até à colheita, as plantas foram irrigadas diariamente pela manhã com 120 mL de água deionizada, e à tarde nutridas com a solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), com valor pH entre 5,5 e 6,5, com volumes de 60; 80; 100 e 120 mL e forças iônicas de 25; 33; 50 e 100%, respectivamente, aos 0 a 15; 16 a 30; 31 a 40 e 41 a 54 dias após o transplântio (DAT).

Para a aplicação foliar, utilizou-se pulverizador manual com volume de calda por planta variável, em função do desenvolvimento das plantas, sendo para acelga 0,75; 1,5; 2,0 mL de Si, aos 20; 30 e 40 DAT e para couve 0,5; 1,0; 1,5 mL de Si, aos 20; 30 e 40 DAT, respectivamente. O valor pH da calda com Si, em ambas as fontes, foi de 6,7. As aplicações foram realizadas a partir das 17 h, com umidade relativa do ar entre 60 e 70%. As correções do valor pH da solução nutritiva e da calda contendo Si foram realizadas com solução de HCl ( $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ) ou NaOH ( $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ).

As plantas de acelga foram colhidas aos 48 DAT, e as da couve aos 54 DAT. Antes das colheitas, foram medidas as alturas das plantas com auxílio de uma régua com 50 cm de comprimento, e após colhidas, as folhas foram pesadas em balança de precisão, obtendo-se a massa da matéria fresca e, posteriormente, lavadas em solução diluída de detergente neutro, na concentração de  $3 \text{ mL L}^{-1}$ , água corrente, solução de HCl a 0,1N e água deionizada. Em seguida, foram acondicionadas em

sacos de papel Kraft com capacidade para 5 kg, devidamente identificados e colocadas para secar em estufa de circulação forçada de ar, a 65 °C, por 72 horas. Decorrido esse tempo, as folhas foram novamente pesadas em balança de precisão, obtendo-se a massa da matéria seca. Depois, as folhas foram moídas em moinho de facas tipo Willey, obtendo-se a parte mais fina das amostras, e em seguida foram armazenadas em saquinhos de papel e levadas para o laboratório de solos e adubos da UNESP Jaboticabal para a determinação dos teores de Si.

A partir da massa da matéria seca, foram determinados os teores de Si, conforme método descrito por Korndörfer, Pereira e Nolla (2004). Realizou-se o cálculo do acúmulo de Si nas folhas das hortaliças a partir dos dados do teor de Si e da massa da matéria seca.

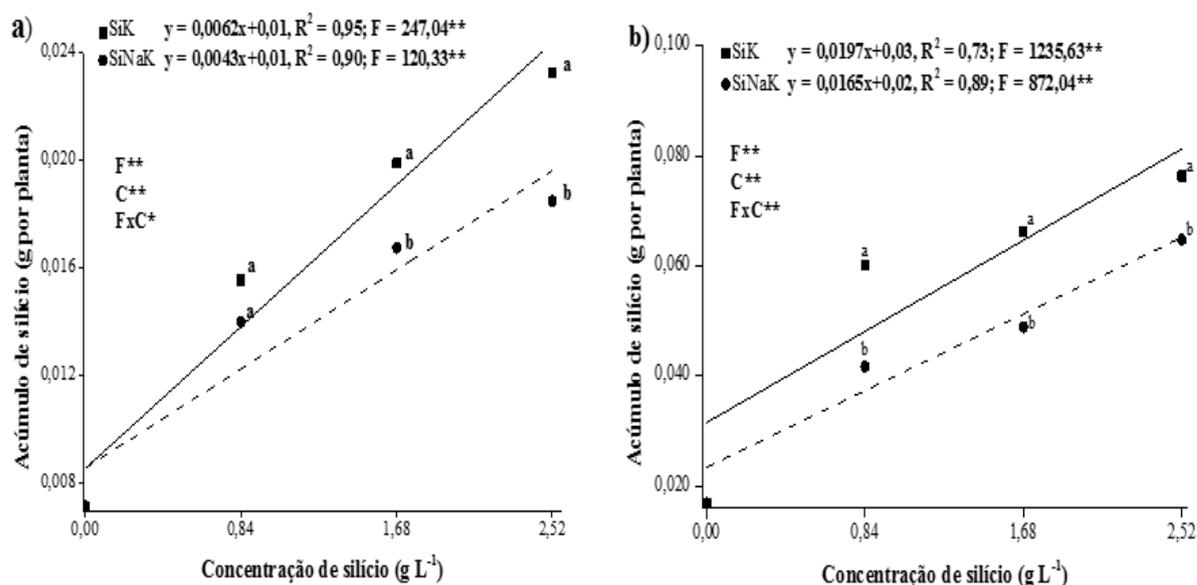
A perda de água foi determinada em percentual, considerando-se a diferença entre a massa inicial das folhas frescas e aquela obtida a cada intervalo de 1 dia, durante 4 dias de armazenamento em geladeira, à temperatura de 6 °C. Para a demonstração da perda de água da acelga e da couve (Figuras 8a e 8b), utilizou-se a maior concentração das duas fontes. Avaliou-se o teor de vitamina C nas folhas frescas das hortaliças por titulação com iodeto de potássio (BRASIL, 2005).

Os dados obtidos foram submetidos às análises de variância, pelo teste F, e, quando significativo, para as fontes, ao teste de comparação t de Student (LSD), a 5% de probabilidade, e para as concentrações, ao estudo da regressão polinomial, utilizando-se do software estatístico AgroEstat® (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR 2015).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve interação entre as fontes e as concentrações de Si para o acúmulo de Si nas folhas da acelga e nas folhas da couve (Figuras 2a e 2b). O aumento na concentração de Si aplicado resultou em incremento linear do acúmulo de Si, nas duas fontes utilizadas, em ambas as hortaliças. Observou-se que a aplicação foliar de Si na forma de SiK estacou-se da fonte SiNaK nas concentrações de 1,68 e 2,52 g L<sup>-1</sup> de Si, para acúmulo de Si, nas folhas da acelga (Figura 2a), e em todas as concentrações de Si para as folhas da couve (Figura 2b).

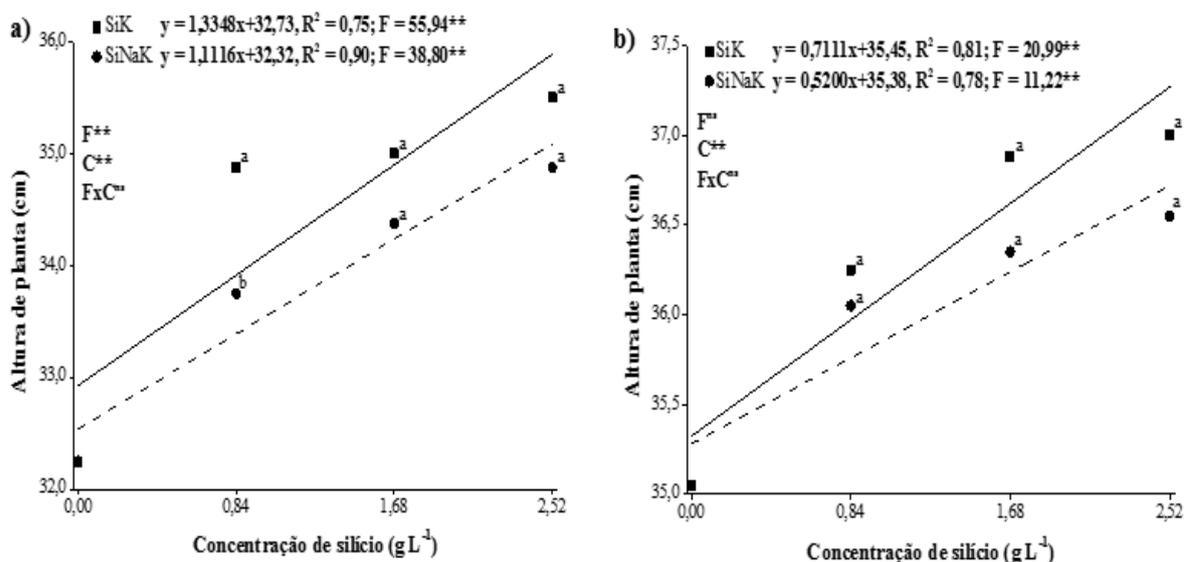
O incremento no acúmulo de Si nas hortaliças indicou que a aplicação foliar de Si favoreceu a absorção foliar do elemento pelas plantas, mesmo estas não sendo acumuladoras. No entanto, para conhecer a biofortificação, é preciso obter o teor do elemento no tecido vegetal.



**Figura 2.** Acúmulo de Si na acelga (a) e na couve (b), em função das concentrações (C) de Si via foliar, nas fontes (F) de silicato de potássio (SiK) e silicato de potássio e sódio estabilizado (SiNaK). \*\* e \*: Significativo a 1 e a 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. Letras iguais são semelhantes pelo teste t-Student, a 5% de probabilidade.

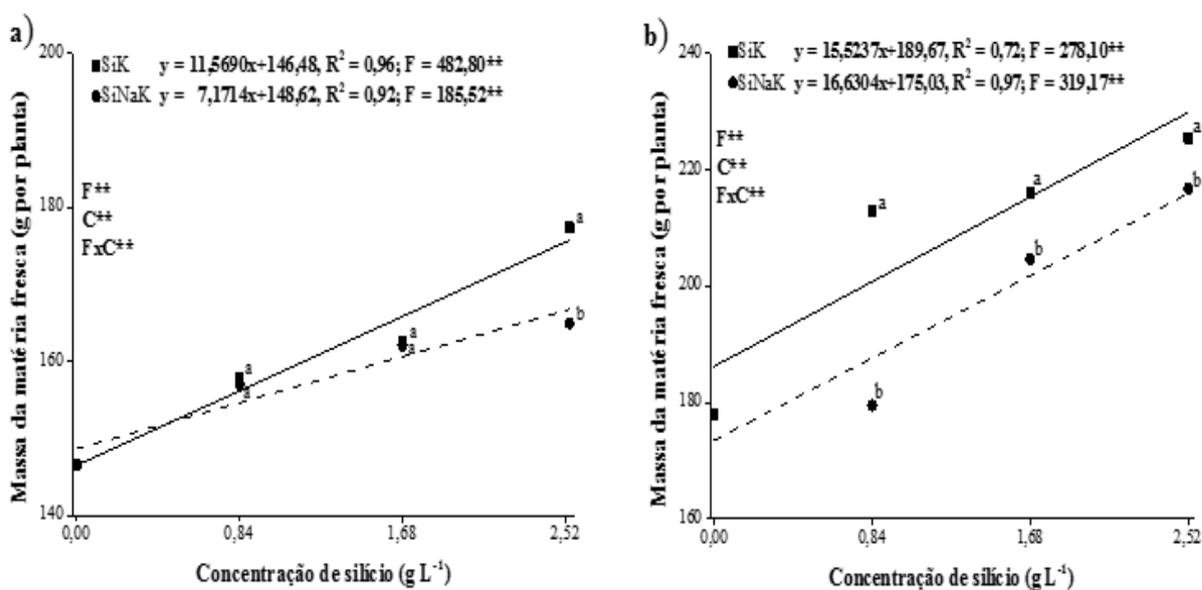
A altura das plantas de acelga e da couve foi alterada pelas fontes e concentrações de Si via foliar (Figuras 3a e 3b). O aumento na concentração de Si aplicado via foliar resultou em incremento linear para a altura das duas hortaliças,

independentemente da fonte utilizada (Figuras 3a e 3b). As duas fontes de Si foram semelhantes nas hortaliças, exceto na acelga, na concentração de Si igual a 0,84 g L<sup>-1</sup> em que se destacou SiK (Figura 3a).



**Figura 3.** Altura da planta da acelga (a) e da couve (b), em função das concentrações (C) de Si via foliar nas fontes (F) de silicato de potássio (SiK) e silicato de potássio e sódio estabilizado (SiNaK). <sup>ns</sup> e <sup>\*\*</sup>: Não significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. Letras iguais são semelhantes pelo teste t-Student, a 5% de probabilidade.

Houve interação entre as fontes e as concentrações para a massa da matéria fresca nas folhas da acelga e da couve (Figuras 4a e 4b). O aumento na concentração de Si foliar aplicado resultou em incremento linear na massa da matéria fresca das duas hortaliças, independentemente da fonte utilizada (Figuras 4a e 4b). Este efeito benéfico do Si na massa da matéria fresca é explicado pelo efeito do elemento verificado na altura das plantas (Figuras 4a e 4b).



**Figura 4.** Massa da matéria fresca da acelga (a) e da couve (b), em função das concentrações (C) de Si via foliar, nas fontes (F) de silicato de potássio (SiK) e silicato de potássio e sódio estabilizado (SiNaK). \*\*: Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F. Letras iguais são semelhantes, pelo teste t-Student, a 5% de probabilidade.

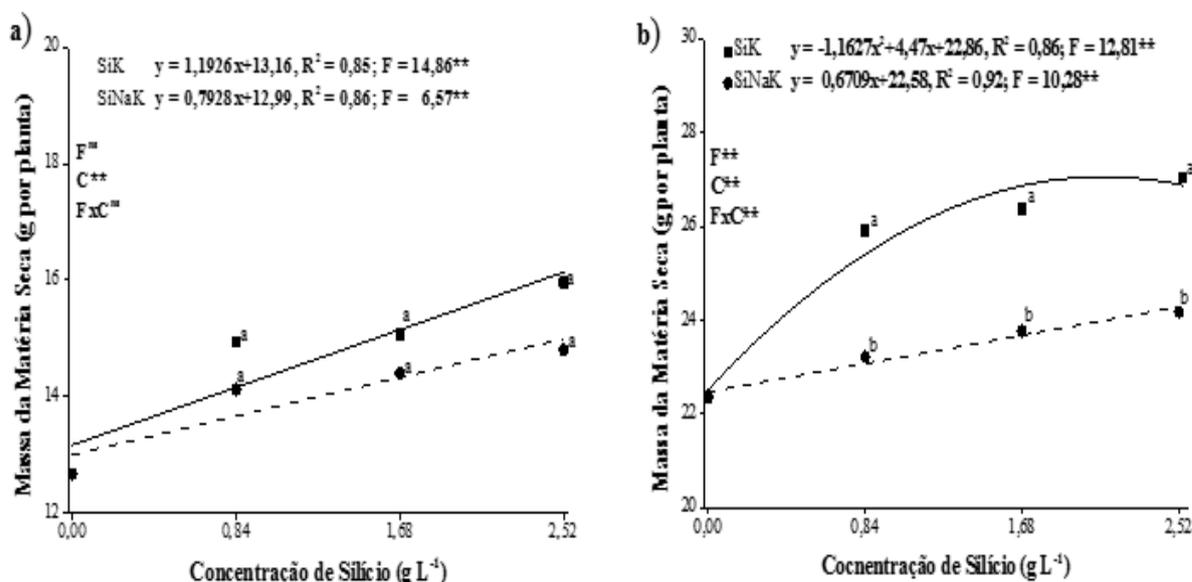
Houve efeito apenas para as concentrações de Si aplicado via foliar na massa da matéria seca das plantas de acelga (Figura 5a); no entanto, houve interação entre fontes e concentrações de Si na massa da matéria seca da couve (Figura 5b).

O aumento na concentração de Si aplicado resultou em aumento com ajuste linear na massa da matéria seca das folhas de acelga (Figura 5a), independentemente da fonte utilizada. Nas folhas da couve (Figura 5b), o aumento na concentração do Si pulverizado resultou em aumento com ajuste quadrático, com a fonte SiK, atingindo o ponto máximo com a concentração de  $1,87 g L^{-1}$  de Si e com ajuste linear com a fonte SiNaK.

Observou-se que a aplicação de Si foliar incrementou a massa da matéria seca em relação ao controle; nas folhas da acelga, o incremento foi de 26%, com emprego do SiK e 17% com SiNaK; já para as folhas da couve, o incremento foi de 21%, com emprego do SiK e 8% com SiNaK. Este efeito benéfico do Si na massa da matéria seca é reflexo do incremento da absorção e acúmulo do Si (Figuras 2a e 2b), que favoreceu a altura das plantas (Figuras 3a e 3b) e a massa da matéria fresca das duas hortaliças (Figuras 4a e 4b).

O benefício da pulverização foliar de Si no acréscimo da massa da matéria seca

foi confirmado pelo efeito do elemento nas variáveis de crescimento dada a alta correlação observada no aumento da altura das plantas da acelga (Figura 3a), ( $r = 0,72^{**}$ ), e da couve (Figura 3b), ( $r = 0,67^{**}$ ), bem como da massa da matéria fresca da acelga (Figura 4a), ( $r = 0,92^{**}$ ) e da couve (Figura 4b), ( $r = 0,84^{**}$ ).



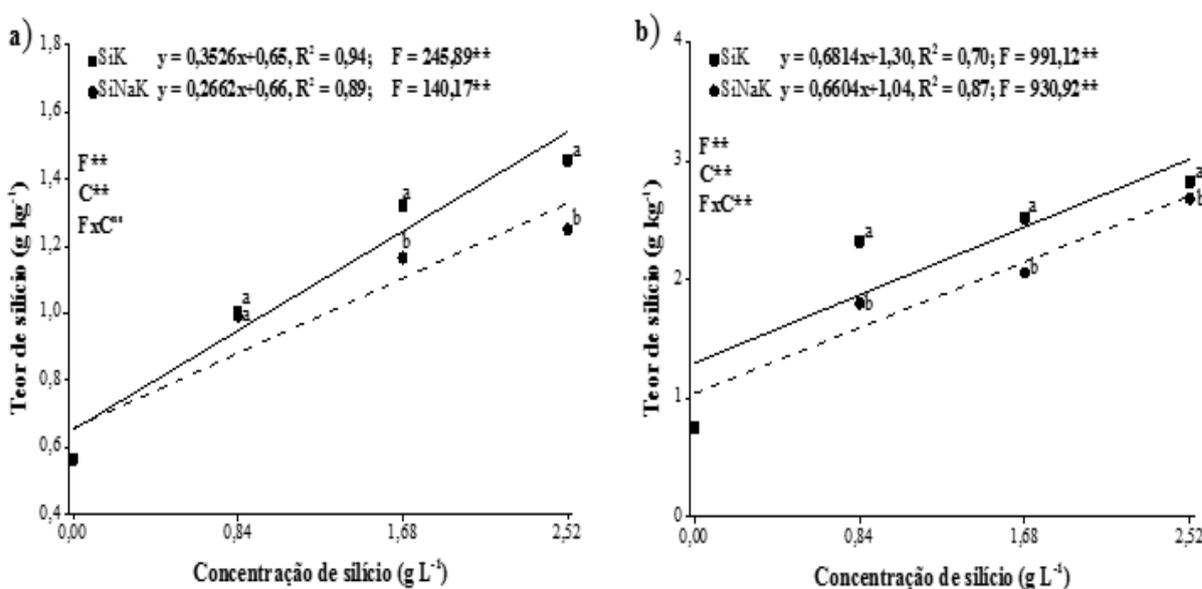
**Figura 5.** Massa da matéria seca da acelga (a) e da couve (b), em função das concentrações (C) de Si via foliar, nas fontes (F) de silicato de potássio (SiK) e silicato de potássio e sódio estabilizado (SiNaK). <sup>ns</sup> e <sup>\*\*</sup>: Não significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. Letras iguais são semelhantes pelo teste t-Student, a 5% de probabilidade.

Houve efeito apenas dos fatores isolados, fontes e concentrações de Si para o teor de Si nas folhas da acelga (Figura 6a), mas houve interação entre os fatores estudados no teor de Si, nas folhas da couve (Figura 6b). O aumento na concentração de Si, nas duas fontes, resultou em incremento linear no teor foliar de Si para as duas hortaliças (Figuras 6a e 6b).

Observou-se que o emprego do silicato de potássio se destacou, promovendo maior teor de Si nas folhas da acelga, nas duas maiores concentrações de Si (Figura 6a), e em todas as concentrações de Si, nas folhas da couve (Figura 6b). Este efeito da pulverização foliar de Si no incremento do teor do elemento benéfico foi também verificado em outras culturas, como alface (RESENDE et al., 2005) e rúcula (GUERRERO; BORGES; FERNANDES, 2011).

Observou-se que a aplicação de Si foliar incrementou o teor de Si nas duas

hortaliças, em relação ao controle (sem Si); na acelga, atingiu 161% com emprego da fonte SiK e 123% com a fonte SiNaK, e para a couve, o incremento foi maior, atingindo 271% com emprego da fonte SiK e 252% com a fonte SiNaK, reforçando o potencial da adubação foliar com Si, na biofortificação das hortaliças. Portanto, a ingestão de hortaliças folhosas biofortificadas pode ser uma alternativa para colaborar com o atendimento nutricional do elemento pelo ser humano.



**Figura 6.** Teor de Si nas folhas de acelga (a) e na couve (b), em função das concentrações (C) de Si via foliar, nas fontes (F) de silicato de potássio (SiK) e silicato de potássio e sódio estabilizado (SiNaK). <sup>ns</sup> e <sup>\*\*</sup>: Não significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. Letras iguais são semelhantes pelo teste t-Student, a 5% de probabilidade.

Não houve interação entre as fontes e as concentrações de Si via foliar para o teor de ascorbato (Vitamina C), nas folhas da acelga (Figura 7a); no entanto, houve interação entre as fontes e concentrações de Si para o teor de ascorbato (Vitamina C), nas folhas da couve (Figura 7b).

O aumento na concentração aplicada de Si via foliar nas folhas da acelga e couve resultou em incremento linear para o teor de ascorbato (Vitamina C) foliar, independentemente da fonte de Si utilizada (Figuras 7a e 7b).

Apenas na couve destacou-se a fonte SiK, especialmente nas duas maiores concentrações de Si empregadas (Figura 7b). Este aumento do teor foliar de

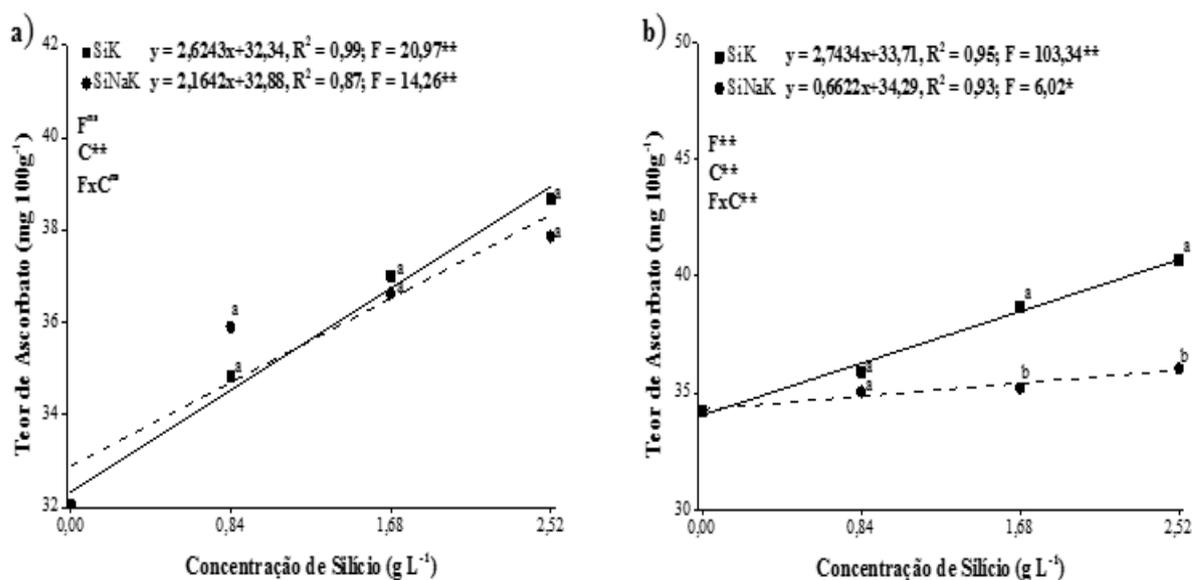
ascorbato (Vitamina C) nas duas hortaliças, com uso das fontes de Si foliar, poderia contribuir com o incremento da massa seca (Figuras 5a e 5b), pois as plantas foram cultivadas sob estresse térmico (Figura 1), que induz a produção de espécies reativas do oxigênio (ROS), o qual provoca danos oxidativos dos componentes celulares (EPSTEIN, 1994).

Nesta situação, o Si, ao induzir maior produção do ascorbato (Vitamina C), pode ter neutralizado o estresse da planta, possivelmente por ter diminuído o teor de ROS. Este fato ocorre porque as plantas podem induzir respostas de defesa contra o estresse oxidativo, ativando os sistemas antioxidantes não enzimáticos, que representam a segunda linha de defesa contra ROS, e as moléculas hidrofílicas como o ascorbato (SUZUKI et al., 2014), que é considerado o antioxidante mais poderoso na célula vegetal (GILL; TUTEJA, 2010).

Estes resultados reforçam que o Si induz aumento do teor de ascorbato em hortaliças, fato inédito em hortaliças folhosas. Existe apenas um relato recente neste sentido, indicado por Ma et al. (2016), que observaram incremento do teor de ascorbato em função da aplicação de Si em plantas de trigo.

O aumento do teor de Vitamina C (ácido ascórbico) ou de ascorbato na forma ionizável, inclusive, propiciou melhoria na qualidade das hortaliças, pois o ácido ascórbico é essencial ao ser humano, e favoreceu o maior crescimento da planta, embora a relação do Si nestes mecanismos ainda seja desconhecida e mereça ser estudada para ser elucidado. No entanto, existem relatos de que a absorção de Si pode aliviar o estresse térmico em diferentes espécies de plantas (EPSTEIN, 1999; TAKAHASHI; KURATA, 2007).

Observou-se que o aumento do teor de ascorbato apresentou alta correlação com o teor foliar de Si para a acelga (Figura 6a), ( $r = 0,74^{**}$ ) e para a couve (Figura 6b), ( $r = 0,61^{**}$ ), aumentou também o acúmulo de Si para a acelga (Figura 2a), ( $r = 0,73^{**}$ ), e para a couve (Figura 2b), ( $r = 0,70^{**}$ ).

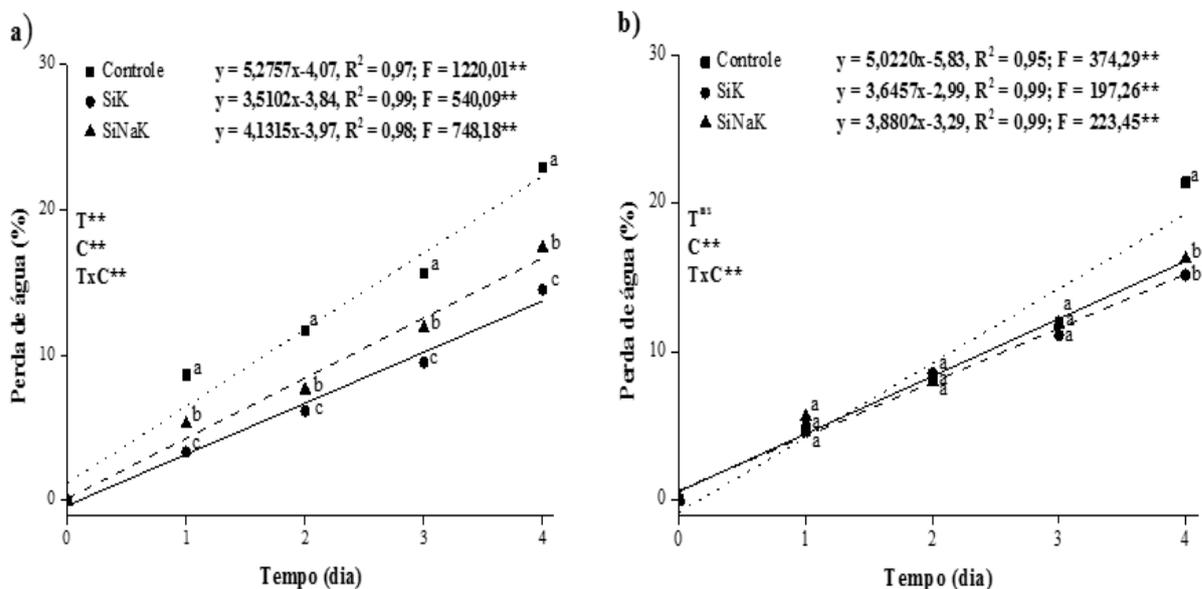


**Figura 7.** Teor de ascorbato (Vitamina C) das folhas de acelga (a) e da couve (b), em função das concentrações (C) de Si via foliar, nas fontes (F) de silicato de potássio (SiK) e silicato de potássio e sódio estabilizado (SiNaK). <sup>ns</sup> e <sup>\*\*</sup>: Não significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. Letras iguais são semelhantes pelo teste t-Student, a 5% de probabilidade.

Os efeitos do Si em ação antioxidante, no tecido vegetal, podem ter efeitos na conservação das folhas pós-colheita. Observou-se que as perdas de água das duas hortaliças aumentaram com ajuste linear, em função do número de dias de armazenamento (Figuras 8a e 8b). Na acelga, as duas fontes de Si diminuíram a perda de água em relação ao controle (sem Si), mas o SiK destacou-se do SiNaK (Figura 8a).

Observou-se, na couve, que o emprego do Si foliar nas duas fontes promoveu menor perda de água em relação ao controle, mas apenas no último dia de armazenamento (Figura 8b). Este efeito benéfico do Si em diminuir a perda de água do tecido vegetal das hortaliças deve-se, possivelmente, à formação de opala na parede celular das células epidérmicas, que já foi relatada devido à diminuição da transpiração (KORNDÖRFER; PEREIRA; CAMARGO, 2004) e devido ao aumento da rigidez dos tecidos. Acredita-se que o Si esteja associado com um complexo lignina-carboidrato na parede celular das células da epiderme, o que pode, de certa forma, contribuir para a maior lignificação da parede celular (INANAGA; OKASAKA; TANAKA, 1995).

A diminuição da perda de água das folhas das hortaliças estudadas reforça o potencial da adubação foliar com Si para melhorar a conservação pós-colheita, fato importante em hortaliças folhosas que têm período curto de prateleira.



**Figura 8.** Perda de água da acelga (a) e da couve (b) durante os dias de armazenamento (D), em função dos tratamentos (T), fontes, silicato de potássio (SiK) e silicato de potássio e sódio estabilizado (SiNaK), na concentração  $2,52 \text{ g L}^{-1}$  de Si e controle, sem Si. <sup>ns</sup> e <sup>\*\*</sup>: Não significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. Letras iguais são semelhantes pelo teste t-Student, a 5% de probabilidade.

## 5 CONCLUSÃO

A aplicação de Si foliar é viável para hortaliças folhosas, acelga e couve, pois incrementou o teor e o acúmulo do elemento, o crescimento e a produção, e melhorou a qualidade (Biofortificação), destacando-se a concentração de Si foliar de  $2,52 \text{ g L}^{-1}$  na forma de silicato de potássio.

## REFERÊNCIAS

AMARO, G. B.; SILVA, D. M.; MARINHO, A. G.; NASCIMENTO, W. M. **Recomendações técnicas para o cultivo de hortaliças em agricultura familiar**. Brasília: Embrapa, 2007, 16 p.

ASHRAF; M.; AFZAL, M.; AHMAD, R.; MAQSOOD, M. A.; SHAHZAD, S. M.; AZIZ, A.; AKHTAR, N. Silicon management for mitigating abiotic stress effects in plants. **Plant Stress**, Punjab, v. 4, n. 2, p. 104–114, 2010.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **Software AgroEstat – Sistema de análises estatísticas de ensaios agrônômicos**. Jaboticabal: UNESP, 2015.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. Brasília, 2005. Disponível em: <<http://www.ial.sp.gov.br/ial/publicacoes/livros/metodo-s-fisico-quimicos-para-analise-de-alimentos>>. Acesso em: 6 jul. 2017.

BORGES L. S.; GUERRERO, A. C.; FERNANDES D. M. Adubação foliar com silício no crescimento de plantas de jambu. **Cultivando o Saber**, Cascavel, v. 3, n. 1, p. 160–170, 2010.

CARLISLE, E. M. Silicon: an essential element for the chick. **Science**, Washington-DC, v. 178, n. 4061, p. 619–621, 1972.

CARLISLE, E. M. Silicon. In: O'DELL, B. L.; SUNDE, R. A. (Eds.). **Handbook of nutritionally essential mineral elements**. New York: Marcel Dekker, 1997. p. 6.3–6.8.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington-DC, v. 91, n. 1, p. 11–17. 1994. Disponível em: <<https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>>.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, p. 641–664. 1999. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641>>

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2007. 412 p.

GALATI, V. C.; GUIMARÃES, J. E. R.; MARQUES, K. M.; FERNANDES, J. D. R.; CECÍLIO-FILHO, A. B.; MATTIUZ, B. H. Aplicação de silício, em hidroponia, na conservação pós-colheita de alface americana 'Lucy Brown' minimamente processada. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 11, p. p. 1932–1938, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20140334>>

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 48, n. 12, p. 909–930, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>>

GODFRAY, H. C. J.; BEDDINGTON, J. R.; CRUTE, I. R.; HADDAD, L.; LAWRENCE, D.; MUIR, J. F.; PRETTY, J.; ROBINSON, S.; THOMAS, S. M.; TOULMIN, C. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. **Science**, Washington-DC, v. 327, n. 5967, p. 812–818, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1126/science.1185383>>

GUERRERO, A. C.; BORGES, L. S.; FERNANDES, D. M. Efeito da aplicação foliar de silício em rúcula cultivada em dois tipos de solos. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 4, p. 591–596, 2011.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soil**. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 1950. 32 p. (Circular, 347)

INANAGA, S.; OKASAKA, A.; TANAKA, S. Does silicon exist in association with organic compounds in rice plant? **Journal Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo v. 41, n. 1, p. 111–117, 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00380768.1995.10419564>>

JUGDAOHSINGH, R. Silicon and bone health. **Journal of Nutrition Health Aging**, Rockville, v. 11, n. 2, p. 99–110, 2007.

KOLESNIKOV, M. P.; GINS, V. K. Forms of silicon in medicinal plants. **Applied Biochemistry and Microbiology**, New York, v. 37, n. 5, p. 524–527, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/A:1010262527643>>

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. 3. ed. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 2004. 28 p. (Boletim Técnico, 01).

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia / Instituto de Ciências Agrárias, 2004. 37 p. (Boletim Técnico, 02)

LAÍN, E. R. **Silício: enfermedades degenerativas ósseas**. Madrid: Real Academia de Ciencias Veterinárias, 1995. Disponível em: <<http://www.racve.es/actividades/medicina-veterinaria/1995-04-19EnriqueRondaLain.htm>>. Acesso em: 8 ago. 2016.

LIANG, Y.; SUN, W.; ZHU, Y. G.; CHRISTIE, P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. **Environmental Pollution**, Barking, v. 147, n. 2, p. 422–428, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>>

LOEPER, J.; GOY-LOEPER, J.; ROZENSZTAJN, L. The antiatheromatous action of silicon. **Atherosclerosis**, Amsterdam, v. 33, n. 4, p. 397–408, 1979

LUENGO, R. F. A.; CALBO, A. G. **Armazenamento de hortaliças**. 21. ed. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2001. p. 173–174.

MA, D.; SUN, D.; CHENYANG, W.; QIN, H.; DING, H.; LI, Y.; GUO, T. Silicon application alleviates drought stress in wheat through transcriptional regulation of multiple antioxidant defense pathways. **Journal of Plant Growth Regulation**, New York, v. 35, n. 1, p. 1–10, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00344-015-9500-2>>

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

MEENA, V. D.; DOTANIYA, M. L.; COUMAR, V.; RAJENDIRAN, S.; KUNDU, S.; RAO, A. S. A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. **Proceedings of the National Academy of Sciences of India – Section B – Biological Sciences**, Allahabad, v. 84, n. 3, p. 505–518, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40011-013-0270-y>>

MORAES, M. F.; PASCOALINO, A. J.; ALVES, J. F. S.; NUTTI, R. M.; CARVALHO, V. L. J. Biofortificação – alternativa à segurança nutricional. **Informações Agrônomicas**, Cascavel, n. 140, p. 9–15, 2012.

NIELSEN, F. H. Update on the possible nutritional importance of silicon. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, Stuttgart, v. 28, n. 4, p. 379–382. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2014.06.024>>

NOVO, M. C. S. S.; PRELA-PANTANO, A.; DEUBER, R.; TORRES, R. B.; TRANI, P. E.; BRON, I. U. **Morfologia de folhas de couve do Banco de Germoplasma do Instituto Agrônomo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2010. 27 p.

REIS, T. H. P.; GUIMARÃES, P. T. G.; FIGUEIREDO, F. C.; POZZA, A. A. A.; NOGUEIRA, F. D.; RODRIGUES, C. R. **O silício na nutrição e defesa das plantas**. Belo Horizonte: Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), 2007. 125 p. (Boletim Técnico, 82).

RESENDE, G. M.; YURI, J. E.; MOTA, J. H.; RODRIGUES JÚNIOR, J. C.; SOUZA, R. J.; CARVALHO, J. G. Produção de alface americana em função de doses e épocas de aplicação de Supa Potássio®. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 2, p. 174–178, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0102-05362005000200002>>

RESENDE, G. M.; YURI, J. E.; SOUZA, R. J. Épocas de plantio e doses de silício no rendimento de alface tipo americana. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 3, p. 455–459, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0102-05362007000300026>>

SILVA, R. W. C.; PAULA, B. L. Causa do aquecimento global: antropogênica versus natural. **Terra e Didática**, Campinas, v. 5, n. 1, p. 42–49, 2009.

SOLOMONS, N. W. The other trace mineral: manganese, molybdenum, vanadium, nickel, silicon, and arsenic. In: SOLOMONS, N. W.; ROSENBERG, I. H. **Absorption and malabsorption of mineral nutrients**. New York: Alan R. Liss, 1984. p. 269–295.

SRIPANYAKORN, S.; JUGDAOHSINGH, R.; THOMPSON, R. P. H.; POWELL, J. J. Dietary silicon and bone health. **Nutrition Bulletin**, London, v. 30, n. 3, p. 222–230, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1467-3010.2005.00507.x>>

SOUZA, R. S. **Efeitos da aplicação de silício sobre a qualidade pós-colheita do repolho (*Brassica oleracea* var. *Capitata* L.) durante o armazenamento**. 2014. 34 f. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

SUZUKI, N.; RIVERO, R. M.; SHULAEV, V.; BLUMWALD, E.; MITTLER, R. Abiotic and biotic stress combinations. **New Phytologist**, London, v. 203, n. 1, p. 32–43, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/nph.12797>>

TAIZ, L.; ZEIG, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Plant physiology and development**. Oxford: Sinauer Associates, 2015. 761 p.

TAKAHASHI, N.; KURATA, K. Relationship between transpiration and silica content of the rice panicle under elevated atmospheric carbon dioxide concentration. **Journal of Agricultural Meteorology**, Kochi, v. 63, n. 2, p. 89–94, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2480/agrmet.63.89>>

TRANI, P. E.; TIVELLI, S. W.; SALLY, F. B.; ANGÉLICA, P. P.; TEIXEIRA, E. P.; ARAÚJO, H. S.; FELTRAN, J. C.; PASSOS, F. A.; NOVO, S. S. M. C. S. S. **Couve de folha: do plantio à pós colheita**. Campinas: IAC, 2015. (Boletim Técnico, 214).

WELCH, R. M. Linkages between trace elements in food crops and human health. In: ALLOWAY, B. J. (Ed.). **Micronutrient deficiencies in global crop production**. New York: Springer, 2008. p. 287–309.

VIEIRA, F. A. **Catálogo brasileiro de hortaliças**. Brasília: Embrapa Hortaliças/Sebrae, 2010. 60 p.