

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**RELAÇÃO DO CÁLCIO E DO SILÍCIO NA PRODUÇÃO DE
MATÉRIA SECA E NA QUALIDADE DE PLANTAS DE
REPOLHO E DE RÚCULA**

Dalila Lopes da Silva
Engenheira agrônoma

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**RELAÇÃO DO CÁLCIO E DO SILÍCIO NA PRODUÇÃO DE
MATÉRIA SECA E NA QUALIDADE DE PLANTAS DE
REPOLHO E DE RÚCULA**

Dalila Lopes da Silva

Orientador: Prof. Dr. Renato de Melo Prado

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).

2021

S586r Silva, Dalila Lopes da
Relação do cálcio e do silício na produção de matéria seca e na
qualidade de plantas de repolho e de rúcula / Dalila Lopes da Silva. --
Jaboticabal, 2021
70 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Renato de Mello Prado

1. Brassicas. 2. Brassica oleracea var. capitata. 3. Eruca sativa
Miller. 4. Deficiência cálcica. 5. Silicato. 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.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

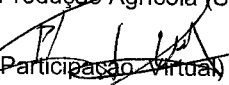
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: RELAÇÃO DO CÁLCIO E DO SILÍCIO NA PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA
E NA QUALIDADE DE PLANTAS DE REPOLHO E DE RÚCULA.

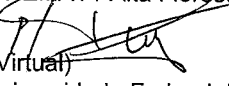
AUTORA: DALILA LOPES DA SILVA

ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

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


Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola (Solos e Adubos) / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. GUSTAVO CAIONE (Participação Virtual)
Universidade do Estado de Mato Grosso/LASAF-UNEMAT / Alta Floresta/MT


Prof. Dr. RILNER ALVES FLORES (Participação Virtual)
Setor de Solos da Escola de Agronomia / UFG - Universidade Federal de Goiás

Jaboticabal, 17 de fevereiro de 2021

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

DALILA LOPES DA SILVA é natural de Tucumã-PA, Brasil. Nascida em 19 de setembro de 1994, filha de Adriania Campelo Lopes. Obteve o título de Bacharel em engenharia agrônoma, pela Universidade Estadual do Tocantins – UNITINS Câmpus Palmas em 2018. Nesta instituição, foi bolsista de iniciação científica por três ciclos 2015 a 2018, realizando pesquisas nas áreas de produção vegetal e nutrição de plantas, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), sob a orientação dos professores Dr. Expedito Alves Cardoso e Dr. Marcos Moraes Soares, integrando os grupos de pesquisa “Biotecnologia e Experimentação Agrícola para a Região Norte – BEM” e “Sistemas de Produção Agrícola no MATOPIBA - SISPAM – UNITINS”. Em março de 2019, ingressou no curso de mestrado, no Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal), da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” UNESP, Câmpus de Jaboticabal, sob a orientação do Prof. Dr. Renato de Mello Prado, onde atualmente integra o “Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da Unesp – GENPLANT”.

*Existe apenas um bem, o saber,
e apenas um mal, a ignorância.*

Sócrates

AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir que todas as sementes que semeei em forma de sonhos se concretizassem, pelo discernimento e espírito amigo nos momentos difíceis. A ele devo todos os meus dias. Pela sustentação do emocional, sou grata à minha melhor amiga e mãe, Adriania Campelo Lopes, pelos seus esforços diários em cultivar meus sonhos tanto quanto ou até mais veementemente que eu própria. A toda a minha família, em especial meus avós Maria Campelo Lopes e Alexandre da Silva Lopes e tio Alexandre Filho Campelo Lopes, pelos seus esforços e dedicação para a minha criação.

Agradeço às minhas amigas Adrielly Luiza e Flávia Cunha, por transmitirem leveza aos meus dias. E a Thales Evangelista, por ser meu porto seguro.

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” UNESP, Câmpus de Jaboticabal, e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal) pela oportunidade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renato de Mello Prado, pela orientação, ensinamentos e paciência, no processo de moldagem e construção da minha formação profissional, sempre atento e disponível a sanar minhas dúvidas de forma didática. Aos professores Dr. Rouverson Pereira, Arthur Bernardes e Dra. Mara Cristina, pelo apoio e solidariedade durante o mestrado.

Agradeço pelo apoio e auxílio na execução das análises laboratoriais a Claudinha, Gelza Carliane, Antônio Márcio, José Sidnaldo e Ellen Nabiça, sempre dispostos a me ajudar e compartilhar seus conhecimentos. A Gelza e Antônio agradeço também pelo auxílio na execução dos experimentos. Aos meus companheiros de jornada Jonas Pereira, Luís Felipe, Mariana Bonfim, José Lucas, Dilier Viciado, Alexander, Kamilla Oliveira, Antônio Santana, Ian e Lucas meus sinceros agradecimentos; sem vocês a caminhada certamente seria mais árdua.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Muito Obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO	II
ABSTRACT	III
CAPÍTULO 1 – Considerações gerais	10
1. Introdução.....	10
2. Revisão de literatura	11
2.1. Importância do repolho e da rúcula.....	11
2.2. Importância do cálcio para as plantas	12
2.3. Importância do silício para as plantas.....	14
3. Referências	16
CAPÍTULO 2 - O silício atenua a deficiência de cálcio aumentando o conteúdo de ácido ascórbico, o crescimento e a qualidade das folhas de repolho	22
Resumo	22
Abstract	23
1. Introdução.....	24
2. Material e métodos	25
2.1. Delineamento experimental e descrição dos tratamentos	25
2.2. Material vegetal e condições de cultivo	26
2.3. Análises.....	28
2.3.1. Índice de vazamento de eletrólito	28
2.3.2. Ácido ascórbico	28
2.3.3. Índice de firmeza das folhas	28
2.3.4. Perda acumulada de matéria fresca.....	28
2.3.5. Matéria fresca e seca da parte aérea e matéria seca da raiz	29
2.3.6. Conteúdo de cálcio e silício	29
2.4. Análise estatística	29
3. Resultados	30
3.1. Acúmulo de Ca e Si na parte aérea e raízes do repolho.....	30
3.2. Índice de extravasamento de eletrólitos e teor de ácido ascórbico.....	31
3.3. Matéria fresca da parte aérea e matéria seca da parte aérea e radicular	32
3.4. Perda acumulada de matéria fresca	33
3.5. Índice de firmeza	34
4. Discussão	35

5. Conclusões	39
6. Referências	39
CAPÍTULO 3 - O silício atenua a deficiência de cálcio em plantas de rúcula aumentando a produção de compostos antioxidantes	45
Resumo	45
Abstract	46
1. Introdução.....	47
2. Material e métodos.....	48
2.1. Descrição local e tratamento.....	48
2.2. Condições de crescimento e material biológico	48
2.3. Análises.....	51
2.3.1. Índice de Extravazamento de eletrólito.....	51
2.3.2. Quantificação de carotenóides e de clorofila.....	51
2.3.3. Eficiência do fotossistema II (Fv / Fm).....	51
2.3.4. Ácido ascórbico	52
2.3.5. Fenóis totais.....	52
2.3.6. Perda acumulada de matéria fresca.....	52
2.3.7. Área foliar, matéria fresca e seca da parte aérea e matéria seca das raízes	53
2.3.8. Conteúdo de Ca e Si.....	53
2.4. Análise estatística.....	53
3. Resultados	54
3.1. O acúmulo de Ca e Si nas folhas e raízes da rúcula.....	54
3.2. Índice de extravasamento de eletrólitos, fenóis totais, carotenóides, teor de AsA, clorofila total e eficiência quântica do FSII	55
3.3. Crescimento da planta, área foliar, matéria fresca e seca da parte aérea e raízes	57
3.4. Perda acumulada de matéria fresca.....	58
4. Discussão	58
5. Conclusão.....	63
Agradecimentos e financiamento.....	63
6. Referências	63

Relação do cálcio e do silício na produção de matéria seca e na qualidade de plantas de repolho e de rúcula

RESUMO: Uma alternativa para atenuar os efeitos dos danos causados pela deficiência nutricional de cálcio (Ca) em plantas de repolho e de rúcula é o fornecimento do silício (Si), tendo em vista seu potencial na redução de desordens nutricionais, porém os mecanismos envolvidos são desconhecidos nestas hortaliças. Objetivou-se verificar se o fornecimento de Si em solução nutritiva mitigaria os efeitos da deficiência de cálcio e se potencializa os efeitos na suficiência deste nutriente, ao aumentar compostos de defesa não enzimáticos e a qualidade pós-colheita nas plantas de repolho e de rúcula. Para isto, foram executados dois experimentos distintos, o primeiro com a cultura do repolho e o segundo com a cultura da rúcula, ambos em esquema fatorial 2x2, sendo deficiência (0,75 mM) e suficiência de Ca (5 mM) combinados na ausência e na presença de silício (2,5 mM) na solução nutritiva, dispostos em blocos casualizados com cinco e sete repetições, respectivamente. A fonte de Si utilizada foi silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol, realizando-se o balanceamento do K na solução nutritiva entre os tratamentos. Em ambos os experimentos, a deficiência de Ca aumentou o estresse oxidativo a partir do aumento do índice de extravasamento de eletrólitos celulares e a partir do baixo teor de composto antioxidante, promovendo a diminuição da produção de matéria seca e da qualidade após o corte das folhas. Ao adicionar Si à solução de cultivo, ocorreu o aumento do conteúdo de ácido ascórbico (AsA) e da firmeza dos tecidos, nas plantas de repolho e de rúcula, fenóis totais, carotenoides, a eficiência quântica do fotossistema II em rúcula, diminuindo o índice de extravasamento celular nas duas culturas, promovendo maior qualidade destas hortaliças pós-colheita.

Palavras-chave: Brassicas, *Brassica oleracea* var. *capitata*, *Eruca sativa* Miller, deficiência cálcica, silicato, antioxidantes não enzimáticos.

Relationship of calcium and silicon in the production of dry matter and in the quality of cabbage and rocket plants

ABSTRACT - An alternative to mitigate the effects of the damages caused by the nutritional deficiency of calcium (Ca) in cabbage and rocket's plants is the supply of silicon (Si), considering its potential to reduce nutritional disorders, however the mechanisms involved are unknown in these vegetables. The objectives were to verify if supplying Si in a nutrient solution would mitigate the effects of calcium deficiency and enhance the effects on the sufficiency of this nutrient, by increasing non-enzymatic defense compounds and post-harvest quality in cabbage and rocket's plants. For this, two different experiments were carried out, the first with the cabbage culture and the second with the rocket culture, both in a 2x2 factorial scheme, being deficiency (0.75 mM) and Ca sufficiency (5 mM) combined in the absence and presence of silicon (2.5 mM) in the nutrient solution, arranged in randomized blocks with five and seven repetitions, respectively. The sources of Si used were sodium silicate and potassium stabilized with sorbitol, the K balance in the nutrient solution was carried out between treatments. In both experiments, Ca deficiency increased oxidative stress by increasing the rate of cell electrolyte leakage and by the low content of antioxidant compound, promoting a decrease in dry matter production and quality after leaf cutting. When adding Si to the culture solution, there was an increase in the content of ascorbic acid (AsA) and the firmness of the tissue, in cabbage and rocket plants, total phenols, carotenoids, the quantum efficiency of photosystem II in rocket, decreasing the index cell extravasation in both cultures, promoting higher quality of these post-harvest vegetables.

Keywords: Brassicas, *Brassica oleracea* var. *capitata*, *Eruca sativa* Miller, calcium deficiency, silicate, non-enzymatic antioxidants.

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1. Introdução

Um dos estresses importantes na agricultura tropical é a deficiência nutricional nos cultivos. Neste contexto, o cálcio (Ca) tem papel fundamental no desenvolvimento da planta, especialmente em virtude da sua principal função na estruturação da planta, participando de membranas e da parede celular (Prado, 2020). As brassicas, a exemplo do repolho e da rúcula, são plantas exigentes em Ca (May et al., 2007), de maneira que sua deficiência provoca limitações severas no crescimento. O Ca é absorvido na forma de Ca^{2+} apenas em regiões meristemáticas da raiz, que representam pouca área superficial de absorção, sendo necessário, para compensar, elevar as concentrações deste nutriente no meio de cultivo para garantir sua absorção adequada (Prado, 2020). Esse fato, aliado às plantas exigentes em Ca, aumenta o risco de ocorrer deficiência deste nutriente.

A deficiência de Ca, ao diminuir conteúdo de pectatos de cálcio, promove danos na formação da parede celular, causando deformação nas folhas e diminuindo a produção de matéria seca (Avalhães et al., 2009), além de induzir estresse oxidativo, provocando danos nas membranas, aumentando o extravasamento de eletrólitos celular (White e Broadley, 2003; Yan et al., 2006) e a degradação da integridade da parede celular (Jain et al., 2019), prejudicando a firmeza dos tecidos com aumento da perda de água, causando a murcha nas folhas (Chao et al., 2009), que pode afetar a qualidade, diminuindo a vida de prateleira do produto colhido.

Para atenuar os danos biológicos da deficiência de cálcio em plantas de repolho, tem-se como opção o uso do Si, que pode aumentar a produção de compostos antioxidantes como ácido ascórbico visto em plantas de trigo (Ma et al. 2016), acelga e couve (Souza et al., 2019), diminuindo o conteúdo de espécies reativas de oxigênio (Galati et al., 2015; Barreto et al., 2017) ao aumentar pigmentos fotossintéticos (Al-aghabary et al., 2004; Lemos Neto et al., 2020) e a eficiência quântica do fotossistema (Lemos Neto et al., 2020). Além disso, o Si na planta pode atuar na parede celular combinando os radicais carboxílicos na formação de ligações cruzadas com a lignina e a pectina (Inanaga et al., 1995), aumentando a rigidez dos tecidos foliares, ao diminuir o fluxo de água das folhas para o ambiente, mantendo

tecidos túrgidos, o que já foi observado em alface cultivada na ausência de deficiência nutricional (Galati et al., 2015).

No entanto, a relação do Ca e do Si na nutrição e na qualidade de *brassicas* ainda é desconhecida, especialmente no que diz respeito aos efeitos do elemento benéfico como mitigador do estresse nutricional de cálcio em repolho e em rúcula. Existem apenas estudos isolados com Si a fim de mitigar fatores de estresse na agricultura, mas seu uso combinado em solução nutritiva com Ca pode ser uma alternativa viável para garantir alta produção com qualidade destas hortaliças.

Diante do exposto, surgiram algumas hipóteses fundamentais para melhor compreensão da relação do Si e do Ca nas hortaliças. O fornecimento de silício nas plantas deficientes de cálcio poderia aumentar a produção de matéria seca, devido ao incremento de compostos antioxidantes (ácido ascórbico) e de pigmentos, favorecendo acúmulo de biomassa e se refletindo na menor perda de água após a colheita, dada maior firmeza das folhas, aumentando a vida de prateleira destas hortaliças. Além disso, hipotetizamos que o fornecimento do silício em plantas suficientes em cálcio não afetaria a produção e a qualidade das brassicas.

Portanto, objetivou-se verificar se o fornecimento de Si em solução nutritiva mitigaria os efeitos da deficiência de cálcio e se potencializa os efeitos na suficiência deste nutriente, ao aumentar compostos de defesa não enzimáticos e a qualidade pós-colheita nas plantas de repolho e de rúcula.

2. Revisão de literatura

2.1. Importância do repolho e da rúcula

Dentre as brassicas, o repolho (*Brassica oleracea* var. *capitata*) é a que apresenta maior importância socioeconômica no país, sendo amplamente consumida em todo o território nacional (Silva et al., 2012). É uma planta herbácea, apresentando caule curto sem ramificações, com folhas arredondadas e cerosas imbricadas formando uma cabeça compacta, com ciclo de cerca de 120 dias, temperatura de cultivo entre 22 a 26 °C, sendo que temperaturas superiores a 27° C provocam sérios

danos. Essa brassica constitui excelente fonte de sais minerais, principalmente cálcio e fósforo (Filgueira, 2013) e de vitaminas A, B1, B2 e C (Nunes et al., 2002).

Por sua vez, a cultura da rúcula (*Eruca sativa* Miller), hortaliça folhosa, como o repolho de porte herbáceo, apresenta ciclo de vida em regiões tropicais próximo de 45 dias até a colheita, tendo temperatura ótima entre 15 a 18°C e apresenta rápido crescimento vegetativo, tendo folhas espessas e divididas, com limbo foliar verde e nervuras verdes claras (Trani et al., 1992). Devido à sua composição nutricional, a rúcula também vem se destacando entre as hortaliças folhosas no país, na medida em que apresenta altos teores de vitamina A e C, fibras, proteínas, potássio e enxofre. No entanto, existe carência de estudos sobre a nutrição mineral desta espécie, tendo seu manejo nutricional geralmente baseado em outras folhosas, como alface (Trani et al., 1992).

2.2. Importância do cálcio para as plantas

Dentre os macronutrientes, o cálcio (Ca) tem papel fundamental no desenvolvimento da planta (Marschner, 1995), tendo como uma de suas principais funções a estruturação da planta, participando de membranas e como parte integrante da parede celular (White e Broadley 2003; Gilliam et al. 2011), além de atuar como mensageiro intracelular no citosol (calmodulina) (Marschner, 1995; Hardingham e Bading, 1999; White e Broadley, 2003; Steinhorst e Kudla, 2014).

Absorvido pelas plantas como Ca^{2+} (Prado, 2020), exerce a função de agente de transdução de sinal, pois é por meio desses processos que a planta tem respostas aos estresses no seu crescimento e desenvolvimento (Dodd et al., 2010; Hepler e Winship, 2010; Kudla et al., 2010). No geral, a concentração adequada de Ca no tecido vegetal para seu adequado desempenho é de 0,1 a 5% (Marschner, 1995).

Em condições normais de produção, é difícil haver deficiência de Ca, no entanto podem ocorrer desequilíbrios no suprimento de nutrientes, causando a “deficiência de Ca” (McLaughlin e Wimmer, 1999), especialmente em brassicas. Uma das razões pelas quais as plantas são suscetíveis a baixa concentração de Ca em seus tecidos é a competição por cargas negativas com outros cátions aos quais Ca está sujeito durante o processo de absorção de nutrientes (Winkler e Knoche, 2019). Outro fator é que o movimento do Ca dentro da planta acontece unicamente via xilema,

dependendo do fluxo de água predominantemente de folhas velhas, nas quais se concentram as maiores taxas de transpirações do tecido para seu acúmulo na planta (Gilliham et al., 2011).

Este macronutriente não é redistribuído dos tecidos mais velhos para os mais novos, forçando os tecidos novos em crescimento a depender do suprimento imediato de Ca do xilema (Prado, 2020). Portanto, a deficiência de Ca apresenta sintomas visuais em folhas jovens em expansão com baixas taxas de transpiração (Gilliham et al., 2011), inibindo o crescimento radicular, prejudicando a absorção de nutrientes pelas plantas (Prado, 2020).

O Ca pode estar envolvido nas mudanças de turgor celular dos tecidos (Hocking et al., 2016). Isso ocorre quando é depositado na parede celular, forma pectatos de cálcio, ao ligar-se covalentemente às pectinas, promovendo maior estabilidade da matriz péctica, reduzindo a vulnerabilidade da parede celular, restringindo a ação da enzima poligalacturonase que degradam substâncias pécticas da parede celular e são reduzidas quando Ca está em altas concentrações (Olle e Bender, 2009).

O Ca atua como cimentante intracelular e também proporciona firmeza aos tecidos vegetais, preservando a integridade funcional e estrutural dos sistemas de membranas em plantas com teores adequados de cálcio (Winkler e Knoche, 2021; Marschner 1995; Poovaiah e Leopold, 1973) verificado em folhas de espinafre (Chao et al., 2009). O Ca desempenha papel importante na firmeza de todos os órgãos da planta para sua manutenção e na qualidade pós-colheita de hortaliças e de frutas, além de diminuir a taxa de senescência foliar, evitando deterioração das membranas mais precocemente (Chitarra e Chitarra, 2005). Ao diminuir a perda de água pelo tecido, devido ao aumento da estabilidade da parede celular, dificulta a perda de água (White e Broadley, 2003).

Portanto, as deficiências locais de Ca podem provocar a ruptura do tecido (Tonetto e Freitas et al., 2014) e aumentar o extravasamento de eletrólitos celular, provocando o aumento de espécies reativas de oxigênio ERO's (Olle e Bender, 2009). Esse fato é muito importante, na medida em que o aumento da concentração de Ca pode inibir a atividade de enzimas que degradam a parede celular, reforçando a

estrutura da parede celular (Hepler e Winship, 2010) e aumentando a vida útil das hortícolas.

Brassicáceas suficientes em cálcio apresentam redução de rompimentos de membranas celulares e retardam a senescência (Chao et al., 2009), consequentemente apresentam maior período de conservação, além de preservar os níveis de vitamina C (Olle e Bender, 2009). Por sua vez, a deficiência nutricional de Ca causa estresse nas plantas, especialmente em *brassicáceas* que são exigentes neste nutriente (May et al., 2007). A deficiência de cálcio pode ocorrer devido ao fornecimento insatisfatório deste nutriente.

Em repolho e rúcula, Ca é o terceiro nutriente com maior extração da solução do solo, abaixo de K e N (Filgueira, 2000). Os sintomas visuais de deficiência de Ca são característicos por apresentarem redução do número de folhas, folhas tortas e com pontas necróticas, com distúrbio dos tecidos meristemáticos em virtude de sua importância como componente da parede celular, além da redução de matéria seca da parte aérea e raiz, e aumento de desordens fisiológicas (Avalhães et al., 2009). Em rúcula, os sintomas são semelhantes aos apresentados nas plantas de repolho, além das folhas velhas amareladas com pecíolo e nervuras arroxeados (Souza et al., 2011).

Em repolho especialmente, quando detectada a deficiência de Ca após o transplântio, é de suma importância o fornecimento deste nutriente antes da formação da cabeça, para evitar o definhamento das folhas novas no ápice da planta do repolho (Filgueira, 2000).

2.3. Importância do silício para as plantas

As espécies de plantas diferem quanto à acumulação de Si em seus tecidos (Ma e Yamaji, 2006). As plantas podem absorver Si na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) (Epstein, 1994), sendo de forma ativa ou passiva. As plantas com modo de absorção ativa tendem a causar o esgotamento de Si na solução, nesse grupo se encontram as plantas acumuladoras de Si ($>10 \text{ g kg}^{-1}$). No entanto, existem plantas que absorvem passivamente, sendo que a concentração de Si na solução sobre variações baixíssimas ou quase nulas, consideradas não acumuladoras de Si ($<5 \text{ g kg}^{-1}$) e as intermediárias ($5\text{-}10 \text{ g kg}^{-1}$) (Ma et al., 2001).

O Si não é considerado essencial para as plantas, embora possa desempenhar papéis importantes nos processos metabólicos, fisiológicos e estruturais das plantas, diminuindo os efeitos de estresses bióticos e abióticos (Ma, 2004; Kim et al., 2014; Hernandez-Apaolaza, 2014; Ma et al., 2016; Wu et al., 2017). O Si promove melhorias no sistema antioxidante das plantas (Al-aghabary et al., 2004; Debona et al., 2017; Zhang et al., 2018) devido ao aumento da concentração de enzimas que diminuem o estresse oxidativo e o extravasamento de eletrólitos celulares (peroxidação lipídica) (Liang et al., 2006; Mateos-Naranjo et al., 2013; Zou et al., 2017), além de aumentar compostos de defesa não enzimáticos como clorofila e carotenoides em alface (Lemos Neto et al., 2020), ácido ascórbico (AsA) em acelga e couve (Souza et al., 2019) e fenóis totais em trigo (Mendonça et al., 2013). Estes mecanismos de defesa inibem diretamente os efeitos deletérios de ERO's, pois no processo de redução de ascorbato peroxidase (APX) são usadas duas moléculas de AsA como doadoras de elétrons para reduzir H_2O_2 em H_2O e O_2 (Lemos Neto et al., 2020), diminuindo a permeabilidade da membrana, mantendo sua integridade e estabilidade (Zhu et al., 2004).

O crescimento e o aspecto visual pós-colheita de hortaliças depende diretamente do estado nutricional do vegetal (Chitarra e Chitarra, 2005). Além dos nutrientes de plantas, o fornecimento de elementos benéficos pode aumentar a produção e a qualidade pós-colheita de hortaliças (Souza et al., 2019).

O fornecimento do Si em solução nutritiva, em especial hortaliças, tem demonstrado resultados satisfatórios, aumentando a firmeza do tecido foliar e vida pós-colheita de plantas de alface (Galati et al., 2015), pois foi verificado nesta espécie microscopicamente o aumento da espessura da cutícula (Pozo et al., 2015). Além disso, o Si incrementou a eficiência quântica do fotossistema II e os teores de clorofila e de carotenoides (Lemos Neto et al., 2020), diminuiu o extravasamento de eletrólitos em couve-flor e em brócolis (Barreto et al., 2017) e aumentou a atividade antioxidante em couve (Wu et al., 2017). Foi verificado efeito do Si no aumento de antioxidantes não enzimáticos, como o ácido ascórbico, em acelga e em couve (Souza et al., 2019) e fenóis em pepino (Maksimović et al., 2007).

Pesquisas envolvendo os efeitos benéficos do Si tem mostrado que seu fornecimento em pulverizações foliares em plantas com deficiência de Ca tem diminuído o extravasamento de eletrólitos e aumento do conteúdo de clorofila já verificado em plantas de tomate (Alonso et al., 2020) e de pepino (González-Terán et al., 2020). No entanto, não há relatos na literatura sobre os benefícios do Si fornecido via foliar ou via solução nutritiva em plantas de repolho e de rúcula deficientes de Ca. Há relatos apenas para a cultura do arroz, indicando que o Si pode atuar na parede celular, ao ligar-se aos radicais carboxílicos aumentando a estabilidade das membranas, atuando na formação de ligações cruzadas com a lignina e a pectina (Inanaga et al., 1995), apresentando uma alternativa para diminuir os danos causados a parede celular em plantas deficientes de Ca.

3. Referências

- Al-aghabary, K., Zhu, Z., Shi, Q. (2004) Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. **J. Plant Nutr.** 27, 2101–2115. <https://doi.org/10.1081/LPLA-200034641>.
- Alonso, T. A. de S., Ferreira Barreto, R., de Mello Prado, R., Pereira de Souza, J., Falleiros Carvalho, R. (2020) Silicon spraying alleviates calcium deficiency in tomato plants, but Ca-EDTA is toxic. **J. Plant Nutr. Soil Sci.** 1–6. <https://doi.org/10.1002/jpln.202000055>.
- Avalhães, C. C., Prado, R. M., Romualdo, L. M., Rozane, D. E., Correia, M. A. R. (2009) Omission of macronutrients of the growth and nutritional status of plants of cabbage grown in nutrient solution. **Biosci. J.** 25, 21–28.
- Barreto, R. F., Schiavon Júnior, A. A., Maggio, M. A., de Mello Prado, R. (2017) Silicon alleviates ammonium toxicity in cauliflower and in broccoli. **Sci. Hortic.** (Amsterdam). 225, 743–750. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.08.014>.
- Chao, L., Weiqian, C., Yun, L., Hao, H., Liang, C., Xiaoqing, L., Fashui, H. (2009) Cerium under calcium deficiency-influence on the antioxidative defense system in spinach plants. **Plant Soil** 323, 285–294. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9937-9>.

Chitarra, M. I. F., Chitarra, A. (2005) **Pós- colheita de Frutos e Hortalças. Fisiologia e Manuseio**. 2 ed. FAEPE, Lavras.

Debona, D., Rodrigues, F. A., Datnoff, L. E. (2017) Silicon's Role in Abiotic and Biotic Plant Stresses. **Annu. Rev. Phytopathol.** 55, 85–107. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035312>.

Dodd, A. N., Kudla, J., Sanders, D. (2010) The language of calcium signaling. **Annu. Rev. Plant Biol.** 61, 593–620. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-070109-104628>.

Filgueira, F. A. R. (2013) **Brassicaceas couves e plantas relacionadas**. In: Novo Manual de Olericultura. p. 285–288.

Galati, V. C., Guimarães, J. E. R., Marques, K. M., Fernandes, J. D. R., Filho, A. B. C., Mattiuz, B. H. (2015) Aplicação de silício, em hidroponia, na conservação pós-colheita de alface americana 'Lucy Brown' minimamente processada. **Cienc. Rural** 45, 1932–1938. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140334>.

Gilliham, M., Dayod, M., Hocking, B. J., Xu, B., Conn, S. J., Kaiser, B. N., Leigh, R. A., Tyerman, S. D. (2011) Calcium delivery and storage in plant leaves: Exploring the link with water flow. **J. Exp. Bot.** 62, 2233–2250. <https://doi.org/10.1093/jxb/err111>.

González-Terán, G. E., Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I. (2020) Effects of silicon and calcium application on growth, yield and fruit quality parameters of cucumber established in a sodic soil. **Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus** 19, 149–158. <https://doi.org/10.24326/asphc.2020.3.13>.

Hardingham, G. E., Bading, H. (1999) Calcium as a versatile second messenger in the control of gene expression. **Microsc. Res. Tech.** 46, 348–355. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0029\(19990915\)46:6<348::AID-JEMT3>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0029(19990915)46:6<348::AID-JEMT3>3.0.CO;2-A).

Hepler, P. K., Winship, L. J. (2010) Calcium at the cell wall-cytoplasm interface. **J. Integr. Plant Biol.** 52, 147–160. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.00923.x>.

Hernandez-Apaolaza, L. (2014) Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? A review. **Planta**, 240, 447–458. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2119-x>.

Hocking, B., Tyerman, S. D., Burton, R. A., Gilliam, M. (2016) Fruit calcium: Transport and physiology. **Front. Plant Sci.** 7, 1–17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00569>.

Inanaga, S., Okasaka, A., Tanaka, S. (1995) Does silicon exist in association with organic compounds in rice plant? **Soil Sci. Plant Nutr.** 41, 111–117. <https://doi.org/10.1080/00380768.1995.10419564>.

Jain, V., Chawla, S., Choudhary, P., Jain, S. (2019) Post-harvest calcium chloride treatments influence fruit firmness, cell wall components and cell wall hydrolyzing enzymes of Ber (*Ziziphus mauritiana* Lamk.) fruits during storage. **J. Food Sci. Technol.** 56, 4535–4542. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03934-z>.

Kim, Y. H., Khan, A. L., Waqas, M., Shim, J. K., Kim, D. H., Lee, K. Y., Lee, I. J. (2014) Silicon Application to Rice Root Zone Influenced the Phytohormonal and Antioxidant Responses Under Salinity Stress. **J. Plant Growth Regul.** 33, 137–149. <https://doi.org/10.1007/s00344-013-9356-2>.

Kudla, J., Batistič, O., Hashimoto, K. (2010) Calcium signals: The Lead Currency of plant information processing. **Plant Cell**, 22, 541–563. <https://doi.org/10.1105/tpc.109.072686>.

Lemos Neto, H. de S., de Almeida Guimarães, M., Mesquita, R. O., Sousa Freitas, W. E., de Oliveira, A. B., da Silva Dias, N., Gomes-Filho, E. (2020) Silicon Supplementation Induces Physiological and Biochemical Changes That Assist Lettuce Salinity Tolerance. **Silicon**. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00715-8>.

Liang, Y., Zhang, W., Chen, Q., Liu, Y., Ding, R. (2006) Effect of exogenous silicon (Si) on H⁺-ATPase activity, phospholipids and fluidity of plasma membrane in leaves of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). **Environ. Exp. Bot.** 57, 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.05.012>.

Ma, D., Sun, D., Wang, C., Qin, H., Ding, H., Li, Y., Guo, T. (2016) Silicon Application Alleviates Drought Stress in Wheat Through Transcriptional Regulation of Multiple Antioxidant Defense Pathways. **J. Plant Growth Regul.** 35, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00344-015-9500-2>.

Ma, J. F. (2004) Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Sci. Plant Nutr.** 50, 11–18.

<https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408447>.

Ma, J. F., Miyake, Y., Takahashi, E. (2001) Chapter 2 Silicon as a beneficial element for crop plants. **Stud. Plant Sci.** 8, 17–39. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80006-9](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80006-9).

Ma, J. F., Yamaji, N. (2006) Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends Plant Sci.** 11, 392–397. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>.

Maksimović, J. D., Bogdanović, J., Maksimović, V., Nikolic, M. (2007) Silicon modulates the metabolism and utilization of phenolic compounds in cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown at excess manganese. **J. Plant Nutr. Soil Sci.** 170, 739–744. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700101>.

Marschner, H. (1995) **Mineral nutrition of higher plants**. 3 ed. Academic Press, London.

Mateos-Naranjo, E., Andrades-Moreno, L., Davy, A. J. (2013) Silicon alleviates deleterious effects of high salinity on the halophytic grass *Spartina densiflora*. *Plant Physiol. Biochem.* 63, 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.11.015>.

May, A., Tivelli, S. W., Vargas, P. F., Samra, A. G., Sacconi, L. V., Pinheiro, M. Q. (2007) **A cultura da Couve-flor**. Inst. Agronômico Campinas 37.

Mendonça, A. O., Tavares, L. C., Brunes, A. P., Monzón, D. L. R., Villela, F. A. (2013) Acúmulo de silício e compostos fenólicos na parte aérea de plantas de trigo após a adubação silicatada. **Biosci. J.**, 29, 1154–1162.

Nunes, M. U. C., Santos, J. R. dos, Sousa, E. F. de (2002) Efeito de adubos de solubilidade lenta na produtividade de repolho e erva-doce consorciados em sistema orgânico de produção. **Bol. Pesqui. e Desenvol.** 51.

Olle, M., Bender, I. (2009) Causes and control of calcium deficiency disorders in vegetables: A review. **J. Hortic. Sci. Biotechnol.** 84, 577–584. <https://doi.org/10.1080/14620316.2009.11512568>.

Poovaiah, B. W., Leopold, A. C. (1973) Deferral of Leaf Senescence with Calcium. **Plant Physiol.** 52, 236–239. <https://doi.org/10.1104/pp.52.3.236>.

Pozo, J., Urrestarazu, M., Morales, I., Sánchez, J., Santos, M., Diane, F., Álvaro, J.

E. (2015) Effects of silicon in thenutrient solution for three horticultural plant families on the vegetative growth, cuticle, and protection against *Botrytis cinerea*. **HortScience** 50, 1447–1452. <https://doi.org/10.21273/hortsci.50.10.1447>.

Prado, R. de M. (2020). **Nutrição de plantas**. 2 ed. São Paulo: UNESP.

Silva, K. S., dos Santos, E. da C. M., Benett, C. G. S., Laranjeira, L. T., Neto, E. E., Costa, E. (2012) Produtividade e desenvolvimento de cultivares de repolho em função de doses de boro. **Hortic. Bras.** 30, 520–525. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362012000300027>.

Souza, J. Z., De Mello Prado, R., Silva, S. L. de O., Farias, T. P., Neto, J. G., Souza Junior, J. P. de (2019) Silicon Leaf Fertilization Promotes Biofortification and Increases Dry Matter, Ascorbate Content, and Decreases Post-Harvest Leaf Water Loss of Chard and Kale. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.** 50, 164–172. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1556288>.

Steinhorst, L., Kudla, J. (2014) Signaling in cells and organisms - calcium holds the line. *Curr. Opin. Plant Biol.* 22, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2014.08.003>.

Tonetto De Freitas, S., McElrone, A. J., Shackel, K. A., Mitcham, E. J. (2014) Calcium partitioning and allocation and blossom-end rot development in tomato plants in response to whole-plant and fruit-specific abscisic acid treatments. **J. Exp. Bot.** 65, 235–247. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert364>.

Trani, P. E., Fornasier, J. B., Lisboa, R. S. (1992) **Cultura da rúcula**. (IAC. Bol. Técnico, 146). 8.

White, P. J., Broadley, M. R. (2003) Calcium in plants. **Ann. Bot.**, 92, 487–511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>.

Winkler, A., Knoche, M. (2019) Calcium and the physiology of sweet cherries : A review. **Scientia Horticulturae**, 245, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.012>.

Wu, Z., Liu, S., Zhao, J., Wang, F., Du, Y., Zou, S., Li, H., Wen, D., Huang, Y., (2017) Comparative responses to silicon and selenium in relation to antioxidant enzyme system and the glutathione-ascorbate cycle in flowering Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis*) under cadmium stress. **Environ. Exp. Bot.** 133,

1–11. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.09.005>.

Yan, Y., Wei, C. L., Zhang, W. R., Cheng, H. P., Liu, J. (2006) Cross-talk between calcium and reactive oxygen species signaling. **Acta Pharmacol. Sin.** 27, 821–826. <https://doi.org/10.1111/j.1745-7254.2006.00390.x>.

Zhang, Y., Shi, Y., Gong, H. J., Zhao, H. L., LI, H. L., HU, Y. H., WANG, Y. C. (2018) Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. **J. Integr. Agric.** 17, 2151–2159. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62038-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62038-6).

Zhu, Z., Wei, G., Li, J., Qian, Q., Yu, J. (2004) Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Plant Sci.** 167, 527–533. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.04.020>.

Zou, M., Yuan, L., Zhu, S., Liu, S., Ge, J., Wang, C. (2017) Effects of heat stress on photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of a heat-sensitive and heat-tolerant cultivar of wucai (*Brassica campestris* L.). **Acta Physiol. Plant.** 39. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2319-z>.

CAPÍTULO 2 - O silício atenua a deficiência de cálcio aumentando o conteúdo de ácido ascórbico, o crescimento e a qualidade das folhas de repolho

Resumo - A deficiência de cálcio (Ca) em plantas de repolho induz danos oxidativos, diminuindo o crescimento e a qualidade, mas a inclusão do silício (Si) na solução nutritiva de cultivo pode aliviar esses prejuízos na cultura. Objetivou-se avaliar se o fornecimento de silício em solução nutritiva diminui os efeitos da deficiência de cálcio em plantas de repolho. O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação no esquema fatorial 2x2, tendo soluções nutritivas para induzir deficiência (0,75 mM) e suficiência de cálcio (5 mM) na ausência (0 mM) e na presença de silício (2,5 mM) com cinco repetições, dispostos em blocos casualizados. Aos 91 dias após transplântio, realizou-se corte das plantas para as avaliações biológicas. Na ausência de Si, a deficiência de Ca promoveu estresse oxidativo, baixo teor de composto antioxidante, diminuindo a produção de matéria seca e a qualidade após o corte das folhas. Por outro lado, a adição de Si atenuou a deficiência de Ca, ao diminuir o extravasamento celular e aumentar o conteúdo de ácido ascórbico, matéria fresca e seca, além de proporcionar aumento da firmeza das folhas, devido à diminuição da perda de água após a coleta. Portanto, destacamos a importância agrônômica do Si adicionado à solução nutritiva, principalmente em lavouras com risco de deficiência de Ca.

Palavras-chaves: Desordem nutricional, estresse abiótico, elemento benéfico, *Brassica oleracea* var. capitata, vitamina C, pós-colheita.

Silicon attenuates calcium deficiency by increasing ascorbic acid content, growth and quality of cabbage leaves⁽¹⁾

Abstract - Calcium (Ca) deficiency in cabbage plants induces oxidative damage, hampering growth and decreasing quality, however it is hypothesized that silicon (Si) added to the nutrient solution may alleviate crop losses. Therefore, this study aims at evaluating whether silicon supplied in the nutrient solution reduces, in fact, the calcium deficiency effects on cabbage plants. In a greenhouse, cabbage plants were grown using nutrient solutions with Ca sufficiency (5 mM) and Ca deficiency (0.75 mM) without and with added silicon (2.5 mM), arranged as a 2 x 2 factorial in randomized blocks, with five replications. At 91 days after transplanting, the plants were harvested for biological evaluations. In the treatment without added Si, Ca deficiency promoted oxidative stress, low antioxidant content, decreased dry matter, and lower quality leaf. On the other hand, added Si attenuated Ca deficiency in cabbage by decreasing cell extravasation while increasing both ascorbic acid content and fresh and dry matter, providing firmer leaves due to diminished leaf water loss after harvesting. The agronomic importance of Si added to the nutrient solution is highlighted, especially in crops under risk of Ca deficiency.

Keywords: Nutritional disorder, abiotic stress, beneficial element, *Brassica oleracea* var. capitata, vitamin C, post-harvest.

⁽¹⁾Capítulo publicado na Scientific reports em 2021.

Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80934-6>

11:1770 (2021)

1. Introdução

As brássicas, a exemplo do repolho, são plantas exigentes em cálcio e a deficiência desse nutriente limita seu crescimento (Almeida et al., 2020; May et al., 2007). O Ca é absorvido apenas em regiões meristemáticas da raiz, que possuem pequena área superficial de absorção, de maneira que, para compensar, é preciso elevar as concentrações de Ca no meio de cultivo para garantir absorção adequada do nutriente (Hawkesford et al., 2012; Marschner, 1995). Esse fato, aliado a plantas exigentes em Ca, pode aumentar o risco de ocorrência de deficiência deste nutriente.

O cálcio, por desempenhar papel estrutural nas plantas devido à formação de pectato, é responsável por manter a estabilidade das paredes celulares nas plantas (Hawkesford et al., 2012; Marschner, 1995). Assim, a deficiência de Ca promove danos na formação da parede celular, causando deformação nas folhas das plantas, se refletindo na produção de matéria seca (Avalhães et al., 2009). Em nível molecular, estudos indicam que a deficiência de Ca em plantas de repolho (Ranjitha et al., 2018) e brócolis (Almeida et al., 2020) causa estresse oxidativo, pois a planta perde os mecanismos de sinalização de defesa.

Assim, a deficiência de Ca aumenta as espécies reativas de oxigênio (ERO's), induzindo estresse oxidativo, provocando danos às membranas e aumentando o extravasamento de eletrólitos celulares (White and Broadley, 2003; Yan et al., 2006). Além disso, esse dano oxidativo causa degradação da integridade da parede celular (Jain et al., 2019), prejudicando a firmeza dos tecidos com aumento da perda de água, causando a murcha das folhas (Chao et al., 2009), afetando a qualidade e diminuindo a vida de prateleira do produto colhido.

Uma alternativa para atenuar os danos biológicos da deficiência de cálcio em plantas de repolho é o uso do silício (Si), que pode aumentar a produção de compostos antioxidantes, como o ácido ascórbico, visto em plantas de trigo (Ma et al., 2016), acelga e couve (Souza et al., 2019). Estudos também indicam que o Si diminui o conteúdo de ERO's (Galati et al., 2015; Barreto et al., 2017; Souza et al., 2019) e, consequentemente, o estresse oxidativo. Além disso, o Si pode atuar na parede celular combinando os radicais carboxílicos na formação de ligações cruzadas com a lignina e a pectina (Inanaga et al., 1995), permitindo maior rigidez dos tecidos foliares, o que pode diminuir fluxo de água das folhas para o ambiente, mantendo os tecidos

túrgidos por mais tempo após a colheita, melhorando sua qualidade, fato constatado em alface, mas sem deficiência nutricional (Galati et al., 2015). Assim, é possível inferir que o Si poderia atuar de forma semelhante ao Ca na parede celular, conferindo maior firmeza dos tecidos.

Portanto, o fornecimento de Si ao repolho via solução nutritiva pode ser uma alternativa para reduzir os danos causados pela deficiência de Ca. No entanto, os efeitos do fornecimento de Si ao repolho cultivado sob deficiência de Ca ainda são desconhecidos. Além disso, os estudos com foco em Si suplementar são em sua maioria realizados utilizando pulverizações foliares (Alonso et al., 2020; Souza et al., 2019), ao passo que os efeitos do Si fornecido via solução nutritiva ainda são pouco explorados.

Portanto, surge a hipótese de que a adição de Si na solução nutritiva atenua os efeitos da deficiência de Ca em plantas de repolho ao diminuir os danos oxidativos, uma vez que aumenta o teor de ácido ascórbico, favorecendo o acúmulo de biomassa e diminuindo a perda de água após a colheita, resultando em maior firmeza das folhas. Aceitar essa hipótese permitirá acréscimo de Si na solução nutritiva de cultivo para potencializar a produção e a qualidade do repolho cv. Chato de Quintal, especialmente em cultivos com algum nível de deficiência em Ca.

Diante do exposto, objetivou-se avaliar se o fornecimento de silício em solução nutritiva diminui os efeitos da deficiência de cálcio em plantas de repolho cv. Chato de Quintal.

2. Material e métodos

2.1. Delineamento experimental e descrição dos tratamentos

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação na Universidade Estadual Paulista, município de Jaboticabal, Brasil, no período de março a junho de 2019.

O delineamento utilizado foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 2x2 sendo: deficiência (5 Mm) e suficiência de Ca (5 mM), ausência (0 Mm) e suficiência de (2,5 mM), com cinco repetições.

A fonte de Si foi silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol (107 g L⁻¹ Si; 16,44 g L⁻¹ K₂O e 60,7 g L⁻¹ Na₂O e pH 11,8). Realizou-se o balanceamento

do potássio na solução nutritiva entre os tratamentos utilizando KCl. Os tratamentos com deficiência de Ca receberam 10% da concentração de cálcio indicada na solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), durante 60 dias após o transplântio (DAT) das plantas; após esse período, foi realizada omissão deste nutriente na solução nutritiva até a coleta das plantas.

2.2. Material vegetal e condições de cultivo

Foram semeadas sementes de repolho (*Brassica oleracea* var. Capitata), cultivar Chato de Quintal, em uma bandeja de isopor de 200 células, preenchida com areia lavada, recebendo água destilada duas vezes ao dia, onde permaneceram até atingirem o ponto de transplântio.

Aos 26 dias após a semeadura (DAS), realizou-se o transplântio das mudas para vasos de polipropileno de 1,7 L, preenchidos com 1,5 L de areia lavada. A unidade experimental foi constituída por um vaso, com uma planta de repolho. A areia foi lavada com água corrente em uma peneira fina, em seguida saturada com solução de HCl a 1 mol L⁻¹ com o objetivo de eliminar o resíduo de matéria orgânica, durante um período de 24 horas, posteriormente realizando-se a lavagem da areia com água deionizada para retirar do excesso de HCl. Após o transplântio das mudas, a temperatura e a umidade relativa do ar do interior da casa de vegetação foram registradas diariamente, usando um termo-higrômetro (Figura 1). As médias das temperaturas máxima e mínima apresentaram amplas variações ($38,7 \pm 21,2$ °C), durante todo o período experimental, sendo em quase todo o período superiores à temperatura ótima da cultura, na medida em que o cultivo em temperaturas acima de 27 °C é conhecido por causar estresses a estas plantas (Luz e Oliveira, 1997).

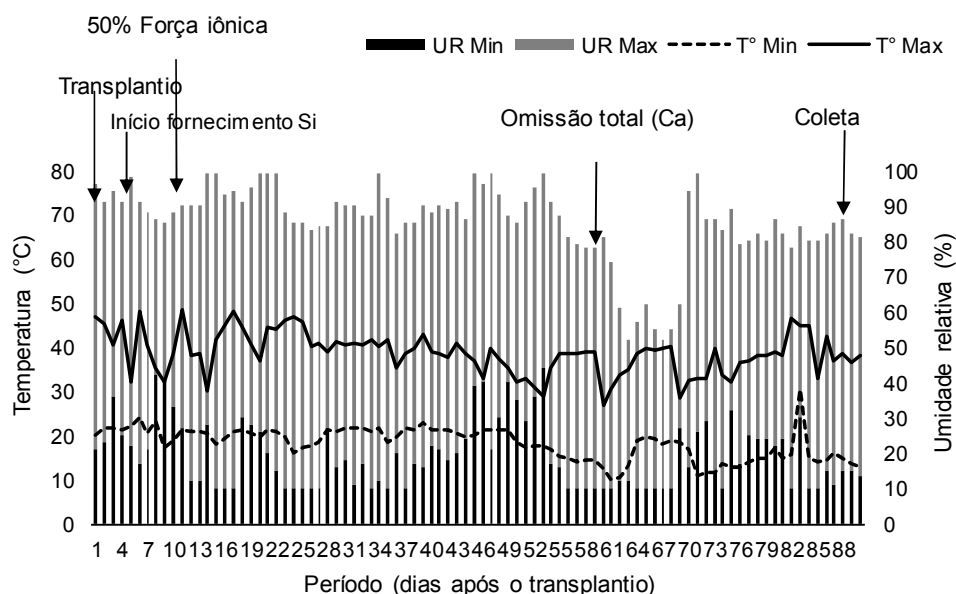


Figura 1. Temperaturas máxima (T ° Max) e mínima (T ° Min) e umidade relativa máxima (UR Max) e mínima (UR Min) no interior da casa de vegetação, após o transplântio das mudas. Indicações do momento da omissão total de Ca e data de coleta do repolho cv. Chato de Quintal.

Após o transplântio, foram realizados o fornecimento da solução nutritiva completa e os respectivos tratamentos em duas aplicações diárias via radicular, no início da manhã e no final da tarde. As soluções foram preparadas com água destilada e deionizada duas vezes. Soma-se a isto fato de que na água utilizada no experimento foi analisada em laboratório a presença de Si, a fim de viabilizar seu uso no experimento.

Utilizou-se a solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), com alteração da fonte de ferro de Fe-EDTA para Fe-EDDHA e de Ca conforme os tratamentos. Realizou-se diariamente o ajuste do valor pH da solução nutritiva mantendo-a $5,5 \pm 0,2$ com o uso de solução de HCl ou NaOH, ambos a $1,0 \text{ M L}^{-1}$.

Nos primeiros 10 dias, a concentração da solução nutritiva da força iônica da solução nutritiva foi de 25%, sendo posteriormente aumentada para 50%, permanecendo até o final do experimento.

2.3. Análises

2.3.1. Índice de vazamento de eletrólito

Aos 91 DAT, seis discos foliares (7,61 mm cada) foram coletados da terceira folha mais jovem da região central da formação da cabeça do repolho, para determinar o índice de extravasamento de eletrólitos celulares, seguindo a metodologia proposta por Dionisio-Sese e Tobita (1998). Os discos foliares foram imersos em 20 mL de água deionizada em um béquer à temperatura ambiente, e deixados em repouso por duas horas. Após esse período, verificou-se a condutividade elétrica da solução (EC1), com um medidor de condutividade de bancada (medidor digital TDS-3). Em seguida, as amostras foram autoclavadas a 120 °C por 20 minutos, e após o resfriamento das amostras uma nova leitura foi realizada visando à obtenção da condutividade elétrica final (EC2). O índice de extravasamento de eletrólitos foi determinado de acordo com a equação $EC1 / EC2 \times 100$.

2.3.2. Ácido ascórbico

O teor de ácido ascórbico (AsA) foi quantificado por titulação com solução de dicloro-fenol-indofenol sódico 2,6 (reativo de Tillman) e os resultados foram expressos em mg de ácido ascórbico por 100g MF (matéria fresca) (AOAC, 1980). Para a extração do AsA, folhas novas e totalmente desenvolvidas da região central do repolho foram utilizadas.

2.3.3. Índice de firmeza das folhas

A firmeza foi medida utilizando-se penetrômetro digital de 5 a 200 N $\pm$ 1 N (Impac, Modelo IP-90DI, São Paulo, SP, Brasil) com ponteira de 8 mm, para isso utilizou-se as folhas da terceira camada do repolho, seguindo a metodologia proposto por Calbo et al., (2010). Três medidas foram feitas no centro de cada folha e os resultados foram expressos em Newton (N).

2.3.4. Perda acumulada de matéria fresca

As plantas de repolho foram armazenadas à temperatura de 25°C, pesadas diariamente por quatro dias, utilizando uma balança eletrônica de 0,02 a 200 g $\pm$ 2 g

(Marte® AL200C). A determinação da perda acumulada de matéria fresca (PAMF) no período avaliado foi calculada com base na diferença entre os pesos da matéria fresca inicial (primeiro dia) e final (quinto dia), dividida pela matéria fresca inicial (primeiro dia) e expresso em porcentagem (%), conforme proposto por Chitarra e Chitarra (2005).

2.3.5. Matéria fresca e seca da parte aérea e matéria seca da raiz

Após a coleta, a parte aérea foi pesada para determinação da matéria fresca. Posteriormente, as folhas do repolho e as raízes foram lavadas em solução de detergente neutro (0,1% v/v), solução de HCl (0,3% v/v), e novamente em água deionizada, secas em estufa de circulação forçada de ar ($65\pm 5^{\circ}\text{C}$) até atingir massa constante, obtendo-se a matéria seca.

2.3.6. Conteúdo de cálcio e silício

As amostras secas foram moídas em moinho tipo Wiley, para determinação dos teores de cálcio, conforme metodologia descrita por Bataglia et al. (1983). A determinação dos teores de Si ocorreu a partir da digestão úmida conforme a metodologia descrita por Kraska e Breitenbeck (2010) e a leitura do elemento foi realizada por espectrofotômetro de absorção atômica, como descrito por Korndörfer et al. (2004). Com base nos teores de Ca e de Si e nos valores da matéria seca, calculou-se o acúmulo de Ca e Si, na parte aérea e na raiz das plantas.

2.4. Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F; quando significativas, as médias foram comparadas pelo teste *t* de Student (LSD), a 5%, por meio do *software* estatístico SAS.

3. Resultados

3.1. Acúmulo de Ca e Si na parte aérea e raízes do repolho

Foi observada interação para cálcio e silício no acúmulo destes elementos nas plantas de repolho. Os maiores acúmulos de cálcio e silício são observados nos tratamentos com suficiência de Ca na ausência ou na presença de Si (Figura 2 a, c).

Na suficiência de Ca, a adição de Si na solução nutritiva diminuiu acúmulo de Ca na parte aérea e aumentou na raiz da planta (Figura 2 a, b), ao passo que na deficiência de Ca a adição de Si aumentou o acúmulo do nutriente na parte aérea (Figura 2 a). Além disso, o maior acúmulo de Si é observado na deficiência do macronutriente na parte aérea, ao passo que na raiz o maior acúmulo ocorreu no tratamento com suficiência de Ca (Figura 2 c, d).

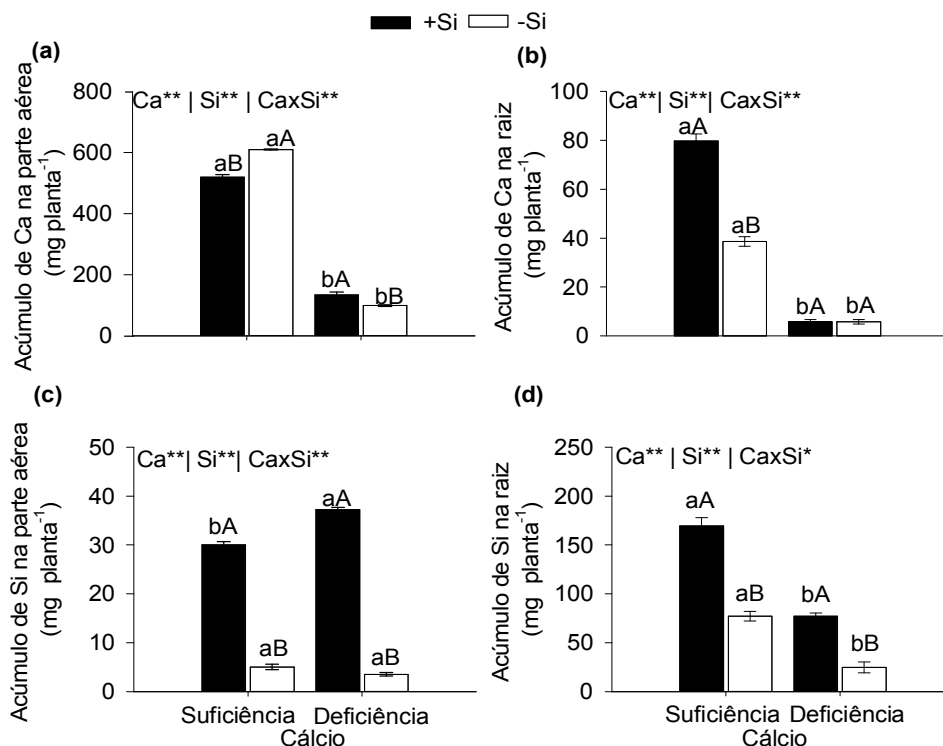


Figura 2. Acúmulo de Ca na parte aérea (a) e raiz (b), acúmulo de Si na parte aérea (c) e raiz (d) de plantas de repolho cultivadas sob suficiência e deficiência de Ca, na presença (+Si) e ausência de Si (-Si). O teste F foi aplicado: * ($p \leq 0,05$) e ** ($p \leq 0,01$). O teste de comparação de médias *t* de Student foi aplicado. Letras minúsculas (a, b) indicam diferenças significativas para o cálcio dentro do mesmo nível de Si

($p < 0,05$). Letras maiúsculas (**A**, **B**) indicam diferenças significativas para silício dentro do mesmo nível de Ca ($p < 0,05$). As barras representam o erro padrão médio. $n = 5$.

3.2. Índice de extravasamento de eletrólito e teor de ácido ascórbico

O índice de extravasamento de eletrólitos e o teor de AsA nas folhas das plantas de repolho depende da interação Ca e Si (Figura 3). As plantas cultivadas sob deficiência de Ca, com ou sem Si, apresentaram maiores índices de extravasamento de eletrólitos em plantas de repolho do que as plantas cultivadas em solução nutritiva com suficiência de Ca (Figura 3 a). No entanto, fornecimento de Si na solução nutritiva diminuiu o índice de extravasamento de eletrólitos foliares de plantas cultivadas em solução nutritiva sob deficiência ou suficiência de Ca.

As plantas cultivadas em solução nutritiva deficiente de Ca, na ausência ou na presença de Si, apresentam menor teor de AsA foliar do que a suficiente de Ca. Entretanto, o fornecimento de silício promoveu aumento dos teores de vitamina C (AsA) foliar em plantas de repolho deficientes de cálcio no dia da colheita (Figura 3 b). No quinto dia de avaliação, o maior teor de AsA nas folhas ocorreu no tratamento com o fornecimento de cálcio e silício na solução nutritiva (Figura 3 c).

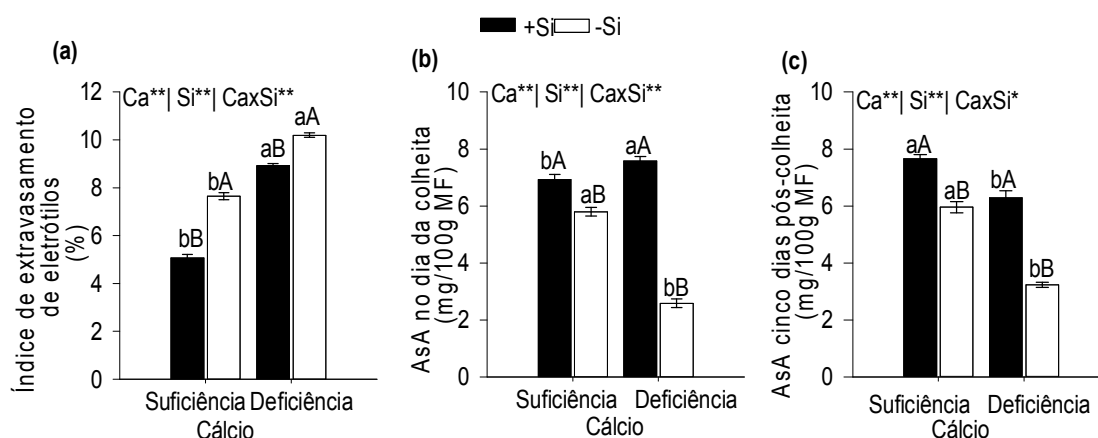


Figura 3. Índice de extravasamento de eletrólitos (a), teor de ácido ascórbico (AsA) no dia da colheita (b) e teor de ácido ascórbico (AsA) cinco dias após a colheita (c) de plantas de repolho cultivadas sob suficiência e deficiência de Ca, na presença (+Si) e ausência de Si (-Si). O teste F foi aplicado: * ($p \leq 0,05$) e ** ($p \leq 0,01$). O teste de

comparação de médias *t* de Student foi aplicado. Letras minúsculas (**a**, **b**) indicam diferenças significativas para o cálcio dentro do mesmo nível de Si ($p < 0,05$). Letras maiúsculas (**A**, **B**) indicam diferenças significativas para silício dentro do mesmo nível de Ca ($p < 0,05$). As barras representam o erro padrão médio. $n = 5$.

3.3. Matéria fresca da parte aérea e matéria seca da parte aérea e radicular

Observou-se efeito da interação de cálcio e silício na matéria fresca da parte aérea de plantas de repolho. Nas plantas sob condições de deficiência de cálcio, houve diminuição dos valores da matéria fresca, atingindo 37 e 31% em comparação às plantas cultivadas sob condições de suficiência de cálcio na presença e na ausência de Si, respectivamente (Figura 4 a). Entretanto, em condições de suficiência de cálcio, o fornecimento de silício em solução nutritiva não afetou a matéria fresca das plantas de repolho.

As plantas de repolho suficientes em cálcio, com ou sem Si, apresentam maiores acúmulos de matéria seca da parte aérea e da raiz (Figura 4 b, c). No entanto, observa-se que em plantas de repolho deficientes de cálcio o acréscimo de silício promoveu maior acúmulo de matéria seca na parte aérea (Figura 4 b). Esses efeitos do Ca e do Si no aumento da matéria seca da parte aérea podem ser observados visualmente (Figura 5), ao mesmo tempo salienta-se que a inclusão do Si na solução nutritiva promoveu acréscimo na matéria seca da raiz na suficiência e na deficiência de Ca.

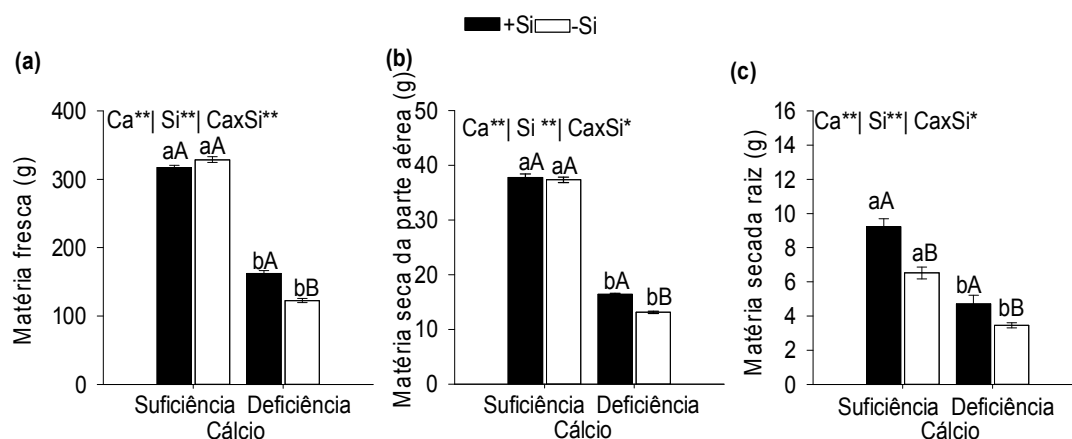


Figura 4. Matéria fresca da parte aérea (a), matéria seca da parte aérea (b) e raízes (c) de plantas de repolho cultivadas sob suficiência e deficiência de Ca, na presença (+Si) e ausência de Si (- Si). O teste F foi aplicado: * ($p \leq 0,05$) e ** ($p \leq 0,01$). O teste de comparação de médias *t* de Student foi aplicado. Letras minúsculas (a, b) indicam diferenças significativas para o cálcio dentro do mesmo nível de Si ($p < 0,05$). Letras maiúsculas (A, B) indicam diferenças significativas para o silício dentro do mesmo nível do Ca ($p < 0,05$). As barras representam o erro padrão médio. $n = 5$.



Figura 5. Plantas de repolho cultivada em solução nutritiva com suficiência e deficiência de cálcio na presença (+Si) e na ausência de Si (-Si).

3.4. Perda acumulada de matéria fresca

Houve interação entre cálcio e o silício na PAMF obtida nos quatro dias de avaliações após a coleta (Figura 6). As plantas de repolho em condição de deficiência nutricional de Ca, sem o fornecimento de Si, em todos os dias de avaliação apresentam maiores percentuais de perda de matéria fresca do que as plantas que receberam o elemento benéfico. A adição de Si na solução nutritiva de cultivo diminui a perda de matéria na deficiência e suficiência de Ca nos dias avaliados.

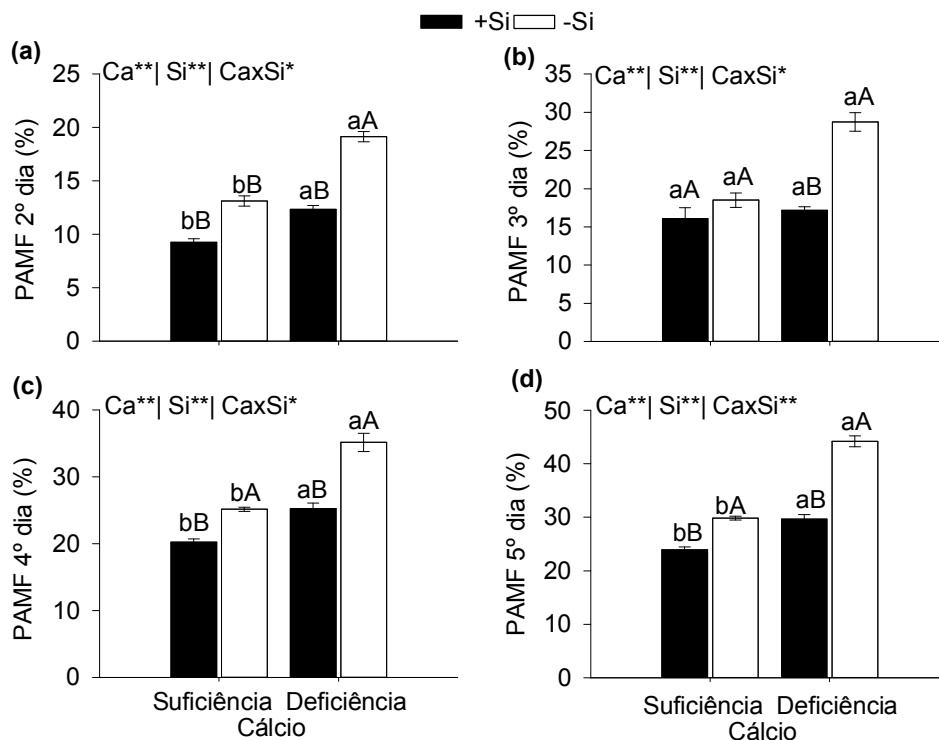


Figura 6. Perda acumulada de matéria fresca (PAMF) do repolho sob suficiência e deficiência de Ca, na presença (+Si) e ausência (-Si), determinada no segundo (a), terceiro (b), quarto (c) e quinto (d) dias após colheita. O teste F foi aplicado: * ($p \leq 0,05$) e ** ($p \leq 0,01$). O teste de comparação de médias *t de Student* foi aplicado. Letras minúsculas (a, b) indicam diferenças significativas para o cálcio dentro do mesmo nível de Si ($p < 0,05$). Letras maiúsculas (A, B) indicam diferenças significativas para silício dentro do mesmo nível de Ca ($p < 0,05$). As barras representam o erro padrão médio. $n = 5$.

3.5. Índice de firmeza

Houve interação de cálcio e silício no índice de firmeza das folhas das plantas de repolho. As plantas cultivadas em solução nutritiva com deficiência de cálcio apresentaram menor índice de firmeza foliar em relação as plantas cultivadas sob suficiência de cálcio na presença ou na ausência de Si (Figura 7). No entanto, nas plantas deficientes em Ca a adição de Si na solução nutritiva aumentou o índice de firmeza das folhas.

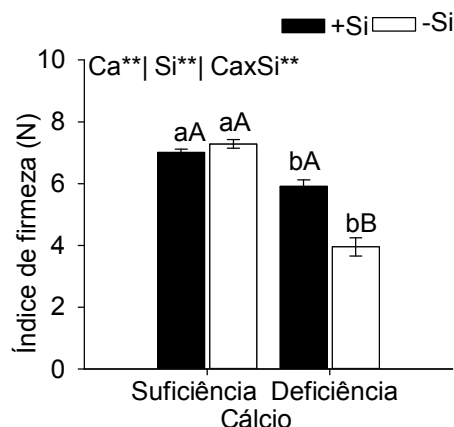


Figura 7. Índice de firmeza foliar no segundo dia após a colheita das plantas de repolho com suficiência e deficiência de Ca, na presença (+ Si) e ausência de Si (-Si). O teste F foi aplicado: * ($p \leq 0,05$) e ** ($p \leq 0,01$). O teste de comparação de médias *t* de Student foi aplicado. Letras minúsculas (**a**, **b**) indicam diferenças significativas para o cálcio dentro do mesmo nível de Si ($p < 0,05$). Letras maiúsculas (**A**, **B**) indicam diferenças significativas para o silício dentro do mesmo nível do Ca ($p < 0,05$). As barras representam o erro padrão médio. $n = 5$.

4. Discussão

As plantas cultivadas em solução nutritiva com deficiência de Ca diminuíram sua absorção em comparação à suficiente, mas a adição de Si na solução nutritiva aumentou a absorção deste macronutriente, pois houve maior acúmulo do elemento na parte aérea (Figura 2 a). Isso indica efeito sinérgico do Si no aumento da absorção de Ca. Este fato possivelmente ocorreu porque Si favorece maior crescimento do sistema radicular da planta (Ribeiro et al., 2011) e possivelmente por um efeito em nível molecular do Si, em aumentar atividade da ATPase nas membranas envolvidas na absorção de Ca (Liang, 1999; Liang et al., 2006). Até onde sabemos, este benefício do Si em plantas deficientes em Ca é inédito, não havendo relatos sobre essa relação.

No entanto, na condição de suficiência de Ca, o Si também aumentou a absorção do nutriente na parte aérea, fato já observado em plantas de milho (Kaya et al., 2006), trigo (Mali e Aery, 2008), brócolis e couve-flor (Barreto et al., 2017) e em mudas de maracujá amarelo (Silva Júnior et al., 2019). Esses resultados mostram a

importância de novos estudos visando a compreender os mecanismos moleculares do papel benéfico que o Si desempenha na absorção de outros elementos como o Ca.

A diminuição da absorção de Ca nas plantas cultivadas em solução nutritiva com deficiência deste nutriente em comparação à suficiente sem adição de Si na solução nutritiva resultou no aumento do extravasamento de eletrólitos e diminuição do teor de AsA (Figura 3). Esse efeito ocorreu porque a falta de Ca provoca aumento da atividade de enzimas pectolíticas (poligalacturonase) (Olle e Bender, 2009) e peroxidação lipídica indicado pelo malondialdeído (Chao et al., 2009), agravados pela diminuição de compostos antioxidante (AsA), resultando na degradação de compostos da membrana e danos na parede celular, induzindo aumento do extravasamento de eletrólitos (Kochanová et al., 2014).

O aumento do estresse observado no tecido vegetal das plantas cultivadas em solução deficiente de Ca sem adição de Si diminuiu o crescimento da planta e dificultou a produção de matéria fresca e seca da parte aérea e das raízes (Figura 4), fato já relatado em plantas de repolho (Kochanová et al., 2014), couve-flor (Bianco et al., 2015) e outras hortaliças folhosas, como alface (Petrazzini et al., 2014) e manjerição (Borges et al., 2016).

Além disso, ficou evidenciado que a deficiência de Ca aumentou a PAMF das folhas do segundo ao quinto dia após o corte da planta (Figura 6), ou seja, aumentou a perda de água do tecido vegetal, o que pode diminuir a vida de prateleira da presente hortaliça. Esse efeito da alta perda de água do tecido foliar após a colheita das plantas deficientes de Ca foi constatado em hortaliça folhosa, restrito apenas em folhas de espinafre (Chao et al., 2009). A alta PAMF pode ser visível com murcha das folhas, havendo perda da turgidez, verificada nesta pesquisa com a diminuição da firmeza do tecido vegetal de plantas cultivadas na solução nutritiva deficiente em Ca. É conhecida a importância da função estrutural do Ca nas plantas, constituindo a lamela média e a parede celular, conferindo rigidez ao tecido vegetal (Taiz et al., 2017), podendo sua deficiência aumentar fluxo transpiratório do tecido vegetal (Carmona et al., 2015; Chao et al., 2009; Olle e Bender, 2009), diminuindo o conteúdo de água (Chao et al., 2009), além da turgidez e firmeza do tecido vegetal.

Além disso, os resultados mostram que a planta de repolho absorve o Si, pois houve aumento deste elemento na parte aérea e raiz com adição deste elemento

benéfico na solução nutritiva nas plantas com suficiência ou deficiente em Ca (Figura 2 c, d). Os teores de Si na parte aérea nas plantas que receberam Si e com suficiência de Ca atingiram $1,6 \text{ g kg}^{-1}$ (dados não apresentados), indicando que a cultura não é acumuladora de Si, pois o teor benéfico deste elemento é inferior a 5 g kg^{-1} (Ma et al., 2001; Ma e Yamaji, 2006). As plantas classificadas como não acumuladoras apresentam maior acúmulo de Si nas raízes do que na parte aérea, possivelmente em virtude da baixa atividade dos transportadores Lsi1 e Lsi2 nas membranas das células das raízes (Ma e Yamaji, 2008). O comportamento foi semelhante ao observado neste estudo, uma vez que adição de Si na solução nutritiva suficiente em Ca atingiu maior acúmulo de Si na raiz ($170 \text{ mg planta}^{-1}$) (Figura 2 d) em comparação com as partes aéreas ($30 \text{ mg planta}^{-1}$) (Figura 2 c).

Ficou claro que nas plantas deficientes de Ca a adição de Si na solução nutritiva diminuiu o extravasamento de eletrólitos celulares ao aumentar o teor de AsA (Figura 3). Esse benefício do Si possivelmente se deve à soma de fatores, desde seu efeito indireto no favorecimento da absorção de Ca (Figura 2 a) até seus efeitos no aumento de compostos antioxidantes (AsA) (Figura 3 b, c). Essa diminuição do extravasamento de eletrólitos celulares, garantindo a manutenção da integridade do tecido já foi observada em plantas de trigo (Ma et al., 2016), acelga e repolho, mas com pulverizações foliares de Si (Souza et al., 2019), brócolis e couve-flor (Barreto et al., 2017) e milho (Kochanová et al., 2014), mas sem relatos em plantas de repolho.

A adição de Si à solução diminuiu os efeitos da deficiência de Ca, diminuindo o estresse das plantas, ao diminuir o índice de extravasamento de eletrólitos (Figura 3 a), promovendo o crescimento do repolho, devido ao aumento de matéria fresca e seca das partes aéreas e raízes (Figura 4). Esse achado indica efeito benéfico do Si na atenuação do estresse nutricional por deficiência de Ca em plantas de repolho, tornando-se especialmente importante para brassicas, pois é comum deficiência deste nutriente na cultura, o qual limita seu crescimento (Avalhães et al., 2009).

Além disso, Si beneficiou a qualidade pós-coleta das folhas das plantas de repolho cultivada em solução nutritiva deficiente de Ca, o que ficou evidenciado porque o acréscimo de Si na solução nutritiva diminuiu a PAMF do segundo até quinto dia após a colheita (Figura 6). No segundo dia após a coleta das folhas das plantas

de repolho cultivadas em solução nutritiva com deficiência de Ca, com ou sem o fornecimento de Si, observou-se estado impróprio para a comercialização, uma vez que o PAMF era superior a 10% (Figura 6 b), ao passo que nas plantas que receberam Si em condições de suficiência de Ca essa perda foi de 9% de PAMF, dentro dos limites aceitáveis para comercialização, segundo Chitarra e Chitarra (2005). Este fato indica a importância da nutrição de Ca e Si em hortaliça como repolho na melhoria da qualidade para o consumo humano.

No quarto e quinto dias pós-colheita, os resultados indicam a adição de Si nas plantas com suficiência de Ca, diminuiu a PAMF e melhorou a qualidade do repolho no período de armazenamento (Figura 6 c, d). O efeito do Si na pós-colheita já foi relatado para as culturas da alface (Galati et al., 2015), acelga e couve (Souza et al., 2019) cultivadas sem estresse nutricional.

Esta diminuição da PAMF (Figura 6) e maior firmeza do tecido vegetal na presença do Si (Figura 7) possivelmente estão associadas à sua interligação com os polímeros de pectina vistos em plantas de arroz (Barbosa Filho et al., 2001; Cui et al., 2020; He et al., 2015), atuando na síntese de hemicelulose e lignina, incrementando os componentes da parede celular, também relatado em plantas de arroz (He et al., 2015; Inanaga et al., 1995), e pela diminuição das atividades das enzimas que degradam a parede celular (Kochanová et al., 2014) e diminuindo a degradação dos tecidos devido ao aumento do teor de AsA, dada sua ação antioxidante (Manolopoulou and Varzakas, 2011).

Soma-se a isto o aumento do teor de ácido ascórbico (Figura 3 b, c), altamente desejável, devido ao seu efeito benéfico na ação antioxidante visto anteriormente e por ser fonte de uma vitamina (C) essencial para saúde humana (Rokayya et al., 2013), induzindo indiretamente a biofortificação, promovendo maior qualidade nutricional, além do aspecto físico com a firmeza.

Nossa pesquisa evidencia que os efeitos benéficos do Si na qualidade ficaram evidenciados em plantas de repolho cultivadas sob estresse nutricional em comparação à condição sem estresse, corroborando com o indicado na literatura de que Si é mais benéfico às plantas cultivadas sob condições de estresses, na comparação ao cultivo sem estresse (Kim et al., 2014; Barreto et al., 2017; Silva Júnior et al., 2019).

5. Conclusões

A adição de Si na solução nutritiva de cultivo das plantas de repolho aumentou os teores de vitamina C e biomassa, reduzindo a perda de água das folhas, favorecendo, portanto, o armazenamento por maior período no pós-colheita. Esse achado destaca a importância agrônômica da adição de Si à solução nutritiva de cultivo do repolho, especialmente nas plantas que estão sob risco de deficiência de Ca.

Agradecimentos: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Contribuições dos autores: **DLS**: redigiu o manuscrito, com contribuição de todos os autores. **RMP** e **BHM** contribuíram com a conceituação e administração do projeto. **DLS**, **LFLT** e **JLFS** contribuíram com a pesquisa, coletaram e processaram os dados. Todos os autores contribuíram com a revisão do manuscrito. **DLS** é responsável pelo manuscrito como um todo.

6. Referências

- Almeida, H. J. de, Carmona, V. M. V., Cavalcante, V. S., Filho, A. B. C., Prado, R. de M., Flores, R. A., Borges, B. M. M. N., Mauad, M. (2020) Nutritional and Visual Diagnosis in Broccoli (*Brassica oleracea* var . *italica* L.) Plants: Disorders in Physiological Activity, Nutritional Efficiency and Metabolism of Carbohydrates. **Agronomy** 10, 1–18. [https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agronomy10101572](https://doi.org/10.3390/agronomy10101572).
- Alonso, T. A. de S., Ferreira Barreto, R., de Mello Prado, R., Pereira de Souza, J., Falleiros Carvalho, R. (2020) Silicon spraying alleviates calcium deficiency in tomato plants, but Ca-EDTA is toxic. **J. Plant Nutr. Soil Sci.** 1–6. <https://doi.org/10.1002/jpln.202000055>.
- AOAC - Chemists, O. methods of analysis of the association of official analytical (1980)

Analytica Chimica Acta: Preface. **Anal. Chim. Acta** 1018. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.05.035>.

Avalhães, C. C., Prado, R. M., Romualdo, L. M., Rozane, D. E., Correia, M. A. R. (2009) Omission of macronutrients of the growth and nutritional status of plants of cabbage grown in nutrient solution. **Biosci. J.**, 25, 21–28.

Barbosa Filho, M. P., Snyder, G. H., Fageria, N. K., Datnoff, L. E., Silva, O. F., (2001) Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Rev. Bras. Ciência do Solo**, 25, 325–330. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832001000200009>.

Barreto, R. F., Schiavon Júnior, A. A., Maggio, M. A., de Mello Prado, R. (2017) Silicon alleviates ammonium toxicity in cauliflower and in broccoli. **Sci. Hortic.** (Amsterdam), 225, 743–750. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.08.014>.

Bataglia, O. C., Teixeira, J. P. F., Furlani, P. R., Furlani, A. M. C., Gallo, J. R. (1983) **Métodos de análise química de plantas**. Campinas.

Bianco, M. S., Filho, A. B. C., De Carvalho, L. B. (2015) Nutritional status of the cauliflower cultivar “Verona” grown with omission of out added macronutrients. **PLoS One** 10, 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123500>.

Borges, B. M. M. N., Flores, R. A., de Almeida, H. J., Moda, L. R., Prado, R. de M. (2016) Macronutrient omission and the development and nutritional status of basil in nutritive solution. **J. Plant Nutr.**, 39, 1627–1633. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1187742>.

Calbo, A.G., Ferreira, M.D., Pessoa, J.D.C. (2010) A leaf lamina compression method for estimating turgor pressure. **HortScience**, 45, 418–423. <https://doi.org/10.21273/hortsci.45.3.418>.

Carmona, V., Costa, L., Filho, A. (2015) Symptoms of Nutrient Deficiencies on Cucumbers. **Int. J. Plant Soil Sci.**, 8, 1–11. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2015/20243>.

Chao, L., Weiqian, C., Yun, L., Hao, H., Liang, C., Xiaoqing, L., Fashui, H. (2009) Cerium under calcium deficiency-influence on the antioxidative defense system in spinach plants. **Plant Soil** 323, 285–294. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9937-9>.

Chitarra, M. I. F. and Chitarra, A. (2005) **Pós- colheita de Frutos e Hortaliças**.

Fisiologia e Manuseio., 2 ed. ed. Lavras: FAEPE.

Cui, J., Li, Y., Jin, Q., Li, F. (2020) Silica nanoparticles inhibit arsenic uptake into rice suspension cells: Via improving pectin synthesis and the mechanical force of the cell wall. **Environ. Sci. Nano**, 7, 162–171. <https://doi.org/10.1039/c9en01035a>.

Galati, V. C., Guimarães, J. E. R., Marques, K. M., Fernandes, J. D. R., Filho, A. B. C., Mattiuz, B. H. (2015) Aplicação de silício, em hidroponia, na conservação pós-colheita de alface americana ‘Lucy Brown’ minimamente processada. **Cienc. Rural**, 45, 1932–1938. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140334>.

Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I.S., White, P. (2012) Functions of Macronutrients, Marschner’s Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition. **Elsevier** Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>.

He, C., Ma, J., Wang, L. (2015). A hemicellulose-bound form of silicon with potential to improve the mechanical properties and regeneration of the cell wall of rice. **New Phytol.** 206, 1051–1062. <https://doi.org/10.1111/nph.13282>.

Hoagland, D. R., Arnon, D. I. (1950) The water-culture method for growing plants without soil. **Circ. Calif. Agric. Exp. Stn.**, 347.

Inanaga, S., Okasaka, A., Tanaka, S. (1995) Does silicon exist in association with organic compounds in rice plant? **Soil Sci. Plant Nutr.** 41, 111–117. <https://doi.org/10.1080/00380768.1995.10419564>.

Jain, V., Chawla, S., Choudhary, P., Jain, S. (2019). Post-harvest calcium chloride treatments influence fruit firmness, cell wall components and cell wall hydrolyzing enzymes of Ber (*Ziziphus mauritiana* Lamk.) fruits during storage. **J. Food Sci. Technol.**, 56, 4535–4542. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03934-z>.

Kaya, C., Tuna, L., Higgs, D. (2006) Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. **J. Plant Nutr.** 29, 1469–1480. <https://doi.org/10.1080/01904160600837238>.

Kim, Y. H., Khan, A. L., Waqas, M., Shim, J. K., Kim, D. H., Lee, K. Y., Lee, I. J. (2014) Silicon Application to Rice Root Zone Influenced the Phytohormonal and Antioxidant Responses Under Salinity Stress. **J. Plant Growth Regul.** 33, 137–149. <https://doi.org/10.1007/s00344-013-9356-2>.

- Kochanová, Z., Jašková, K., Sedláková, B., Luxová, M. (2014). Silicon improves salinity tolerance and affects ammonia assimilation in maize roots. **Biol.**, 69, 1164–1171. <https://doi.org/10.2478/s11756-014-0411-7>.
- Komdörfer, G. H., Pereira, H. S., Nola, A. (2004). **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Kraska, J. E., Breitenbeck, G. A. (2010) Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 41, 2075–2085. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>.
- Liang, Y. (1999) Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. **Plant Soil**, 209, 217–224. <https://doi.org/10.1023/A:1004526604913>.
- Liang, Y., Zhang, W., Chen, Q., Liu, Y., Ding, R. (2006) Effect of exogenous silicon (Si) on H⁺-ATPase activity, phospholipids and fluidity of plasma membrane in leaves of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). **Environ. Exp. Bot.**, 57, 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.05.012>.
- Luz, F. J. de F., Oliveira, J. M. F. de (1997) Orientações Técnicas para o Cultivo do Repolho em Roraima. **Bras. Empres. Agropecw**, Pesqui. Agroflorestal, Pesqui. Minist, Roraima.
- Ma, D., Sun, D., Wang, C., Qin, H., Ding, H., Li, Y., Guo, T. (2016) Silicon Application Alleviates Drought Stress in Wheat Through Transcriptional Regulation of Multiple Antioxidant Defense Pathways. **J. Plant Growth Regul.** 35, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00344-015-9500-2>.
- Ma, J. F., Miyake, Y., Takahashi, E. (2001) Chapter 2 Silicon as a beneficial element for crop plants. **Stud. Plant Sci.**, 8, 17–39. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80006-9](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80006-9).
- Ma, J. F., Yamaji, N. (2008) Functions and transport of silicon in plants. **Cell. Mol. Life Sci.** 65, 3049–3057. <https://doi.org/10.1007/s00018-008-7580-x>.
- Ma, J. F., Yamaji, N. (2006) Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends Plant Sci.**, 11, 392–397. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>.

Mali, M., Aery, N. C. (2008) Influence of silicon on growth, relative water contents and uptake of silicon, calcium and potassium in wheat grown in nutrient solution. **J. Plant Nutr.** 31, 1867–1876. <https://doi.org/10.1080/01904160802402666>.

Manolopoulou, E., Varzakas, T. (2011) Effect of Storage Conditions on the Sensory Quality, Colour and Texture of Fresh-Cut Minimally Processed Cabbage with the Addition of Ascorbic Acid, Citric Acid and Calcium Chloride. **Food Nutr. Sci.** 02, 956–963. <https://doi.org/10.4236/fns.2011.29130>.

Marschner, H. (1995) **Mineral nutrition of higher plants**, 3rd ed. Academic Press, London.

May, A., Tivelli, S. W., Vargas, P. F., Samra, A. G., Sacconi, L. V., Pinheiro, M. Q. (2007) **A cultura da Couve-flor**. Inst. Agronômico Campinas 37.

Olle, M., Bender, I. (2009) Causes and control of calcium deficiency disorders in vegetables: A review. **J. Hortic. Sci. Biotechnol.** 84, 577–584. <https://doi.org/10.1080/14620316.2009.11512568>.

Petrazzini, L. L., Souza, G. A., Rodas, C. L., Emrich, E. B., Carvalho, J. G., Souza, R. J. (2014) Nutritional deficiency in crisphead lettuce grown in hydroponics. **Hortic. Bras.** 32, 310–313. <https://doi.org/10.1590/s0102-05362014000300012>.

Ranjitha, K., Sudhakar Rao, D. V., Shivashankara, K. S., Roy, T. K. (2018) Integrating calcium chloride treatment with polypropylene packaging improved the shelf life and retained the quality profile of minimally processed cabbage. **Food Chem.** 256, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.012>.

Ribeiro, R. V., da Silva, L., Ramos, R. A., de Andrade, C. A., Zambrosi, F. C. B., Pereira, S. P. (2011) O alto teor de silício no solo inibe o crescimento radicular de cafeeiros sem afetar as trocas gasosas foliares. **Rev. Bras. Cienc. do Solo** 35, 939–948. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300028>.

Rokayya, S., Li, C. J., Zhao, Y., Li, Y., Sun, C. H. (2013) Cabbage (*Brassica oleracea* L. var. capitata) phytochemicals with antioxidant and anti-inflammatory potential. **Asian Pacific J. Cancer Prev.** 14, 6657–6662. <https://doi.org/10.7314/APJCP.2013.14.11.6657>.

Silva Júnior, G. B. D., Prado, R. M., Campos, C. N. S., Agostinho, F. B., Silva, S. L.

O., Santos, L. C. N., González, L. C. (2019) Silicon mitigates ammonium toxicity in yellow passionfruit seedlings. **Chil. J. Agric. Res.** 79, 425–434. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392019000300425>.

Souza, J. Z., de Mello Prado, R., Silva, S. L. de O., FARIAS, T. P., Neto, J. G., Souza Junior, J. P. de (2019) Silicon Leaf Fertilization Promotes Biofortification and Increases Dry Matter, Ascorbate Content, and Decreases Post-Harvest Leaf Water Loss of Chard and Kale. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.** 50, 164–172. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1556288>.

Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., Murphy, A. (2017). **Fisiologia vegetal**, 6th ed. Artmed, Porto alegre.

White, P. J., Broadley, M. R. (2003) **Calcium in plants**. *Ann. Bot.* 92, 487–511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>.

Yan, Y., Wei, C. L., Zhang, W. R., Cheng, H. P., Liu, J. (2006) Cross-talk between calcium and reactive oxygen species signaling. **Acta Pharmacol. Sin.** 27, 821–826. <https://doi.org/10.1111/j.1745-7254.2006.00390.x>.

CAPÍTULO 3 - O silício atenua a deficiência de cálcio em plantas de rúcula, aumentando a produção de compostos antioxidantes

Resumo - O silício (Si) pode ser uma alternativa para mitigar os danos biológicos causados pela deficiência de cálcio (Ca) em plantas rúcula (*Eruca sativa* Miller), porém os mecanismos envolvidos nisso ainda são desconhecidos. Objetivou-se verificar se o fornecimento de Si em solução nutritiva aumenta a defesa antioxidante e diminui os efeitos da deficiência de Ca em plantas de rúcula. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em esquema fatorial 2x2, sendo deficiência (0,75 mM) e suficiência de Ca (5 mM) combinados na ausência e na presença de silício (2,5 mM) na solução nutritiva disposta em blocos casualizados com sete repetições. Aos 36 dias após a semeadura, as plantas de rúcula foram coletadas para avaliações biológicas. A deficiência de Ca promoveu o estresse oxidativo mediante aumento do índice de extravasamento de eletrólitos celulares e baixo teor de composto antioxidante, diminuindo a produção de matéria seca e a qualidade após o corte das folhas. A adição de Si na solução nutritiva com deficiência de Ca em plantas de rúcula diminuiu o índice de extravasamento celular e aumentou os teores de ácido ascórbico, fenóis totais, carotenoides, a eficiência quântica do fotossistema II e a produção de matéria fresca e seca, diminuindo a perda de água foliar após a colheita. Benefícios semelhantes também foram verificados para plantas com suficiência de Ca. Concluiu-se com este estudo a recomendação do uso do Si na solução nutritiva de cultivo da rúcula para garantir maior produção e qualidade pós-colheita.

Palavras-chaves: *Eruca sativa*, elemento benéfico, estresse oxidativo, estresse nutricional, pós-colheita.

Silicon attenuates calcium deficiency in rocket plants, increasing the production of antioxidant compounds

Abstract - Silicon (Si) may be an alternative for mitigating the biological damage caused by calcium (Ca) deficiency on rocket plants (*Eruca sativa* Miller), however the mechanisms involved in this are still unknown. The objective of this study was to verify if supplementing Si to a nutritive solution could increase rocket antioxidant defenses and decrease the effects of calcium deficiency. The experiment had been conducted in a greenhouse under a factorial statistical design of 2x2; a nutritive solution was used to induce calcium deficiency (0.75 mM) and sufficiency (5 mM), with and without silicon (2.5 mM). At 36 days after sowing, some rocket plants were collected for biological evaluations, and after they were done, it could be noticed that Ca deficiency had promoted an oxidative stress in the plants, by increasing the cell electrolyte leakage index and the low content of oxidizing compounds, and decreasing dry matter productivity and its quality after leaf harvesting. Supplementing Si to rocket plants through its nutritive solution, under Ca deficiency, has decreased the cell leakage index and increased the content of ascorbic acid, total phenols, carotenoids, the quantum efficiency of the photosystem II, and fresh and dry matter production. Similar benefits had also been verified for plants under Ca sufficiency. Therefore, this study is concluded by recommending Si supplementation to the nutritive solution used for rocket's cultivation, as an approach to establish better quality and productivity after leaf harvesting.

Keywords: *Eruca sativa*, beneficial element, oxidative stress, nutritional stress, post-harvest.

1. Introdução

A rúcula (*Eruca sativa* Miller) é uma hortaliça folhosa herbácea pertencente à família *Brassicaceae* exigente em cálcio (Ca), sendo o terceiro elemento mais

requerido pela cultura, garantindo crescimento vigoroso das folhas e raízes (Furlani, 1997).

O Ca é fundamental no desempenho dos papéis estruturais da parede celular e membranas (Marschner, 1995) e sua deficiência acomete folhas novas causando deformação (Souza et al., 2011). Estudos em nível celular têm demonstrado que danos causados nas membranas celulares de plantas deficientes de Ca apresentam aumento do extravasamento de eletrólitos celulares (White e Broadley, 2003; Yan et al., 2006) devido ao aumento de espécies reativas de oxigênio (Ranjitha et al., 2018), aumento da atividade da poligalacturonase (Olle e Bender, 2009), que promove a degradação da parede celular (Jain et al., 2019) e perda de água da matéria fresca (Chao et al., 2009).

Uma estratégia para atenuar o estresse nutricional nas plantas seria o fornecimento de silício (Si). As pesquisas envolvendo os efeitos benéficos do Si fornecido em solução nutritiva são relatadas em outras espécies do grupo das hortaliças folhosas, mas sem estresse nutricional, porém restringindo as plantas de alface (Galati et al., 2015). Os autores verificaram que esse elemento aumentou a produção de matéria seca da hortaliça e melhorou a qualidade das folhas diminuindo a perda de água da hortaliça após a colheita. Os benefícios do Si para diminuir as perdas de água possivelmente se devem ao efeito físico decorrente da formação de uma dupla camada sílica na parede das células (Inanaga e Okasaka, 1995; Barbosa Filho et al., 2001). Soma-se a este o efeito bioquímico do Si, observado em outras espécies cultivadas sem estresse, a partir do aumento de compostos antioxidante como ascorbato e carotenoides em folhas de repolho (Wu et al., 2017) e de fenóis em plantas de trigo (Mendonça et al., 2013). Estes benefícios do Si no sistema de defesa antioxidante da planta podem evitar a degradação da clorofila com reflexo na eficiência fotossintética, mas isso ainda não foi estudado.

Portanto, surge a hipótese de que a adição de Si na solução nutritiva beneficia as plantas sob deficiência ou suficiência de Ca em plantas de rúcula porque melhora os mecanismos fisiológicos ao diminuir extravasamento de eletrólitos celulares, motivado pelo aumento de compostos antioxidantes. O aumento da resposta antioxidante da planta permitirá aumento do teor de clorofila e da eficiência quântica do fotossistema II (FSII), suficientes para aumentar a produção e a qualidade da

hortaliça a partir da diminuição da perda de água e aumento dos teores de ácido ascórbico. Aceitar essa hipótese revelará os mecanismos de ação do Si e sua relação com o Ca e também terá a primeira indicação de Si para compor a solução nutritiva de cultivo da rúcula.

Diante do exposto, objetivou-se de forma inédita avaliar se o fornecimento de Si em solução nutritiva aumenta a defesa antioxidante e diminui os efeitos da deficiência de Ca em plantas de rúcula.

2. Material e métodos

2.1. Descrição local e tratamento

O experimento foi desenvolvido no período de outubro a novembro de 2019, em casa de vegetação, localizada na UNESP, Câmpus Jaboticabal, São Paulo, Brasil. O experimento seguiu um esquema fatorial 2x2, sendo a deficiência (0,75 mM) e suficiência de Ca (5 mM), combinadas com a ausência e presença de Si (2,5 mM), dispostos em blocos casualizados, com sete repetições.

Os tratamentos com deficiência de Ca receberam 15% da concentração do nutriente (0,75 mM), indicada na solução de Hoagland e Arnon (1950); o CaCl_2 foi fornecido como fonte de Ca na solução nutritiva (deficiente de Ca) pelo período de 10 dias após sua emergência. Posteriormente a esse período, o nutriente passou a ser omitido na solução nutritiva até a coleta das plantas.

As fontes de Si utilizadas para compor a solução nutritiva foram o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol (107 g L⁻¹ de Si; 16,44 g L⁻¹ de K₂O e 60,7 g L⁻¹ de Na₂O e pH 11,8). Realizou-se o balanceamento do potássio na solução nutritiva entre os tratamentos utilizando KCl.

2.2. Condições de crescimento e material biológico

Sementes de rúcula (*Eruca sativa* Miller), cultivar Folha Larga, TopSeed® Premium, foram semeadas (8 de outubro de 2019) em vasos de polipropileno com capacidade de 5 dm³, preenchidos com 4,5 dm³ de areia lavada com solução de HCl a 1 mol L⁻¹ e posteriormente realizou-se a lavagem da areia com água deionizada para

retirar do excesso de HCl. A unidade experimental foi constituída por um vaso com 23 plantas de rúcula.

A temperatura e a umidade relativa do ar no interior da casa de vegetação foram registradas diariamente durante o período experimental com uso de termo-higrômetro (Figura 1). Grande variação foi observada para a temperatura média máxima ($47,2^{\circ}\text{C} \pm 19,8^{\circ}\text{C}$) durante o período do experimento, encontrando-se acima da temperatura relatada para a cultura, que é comumente entre 15 a 20°C (Trani et al., 1992).

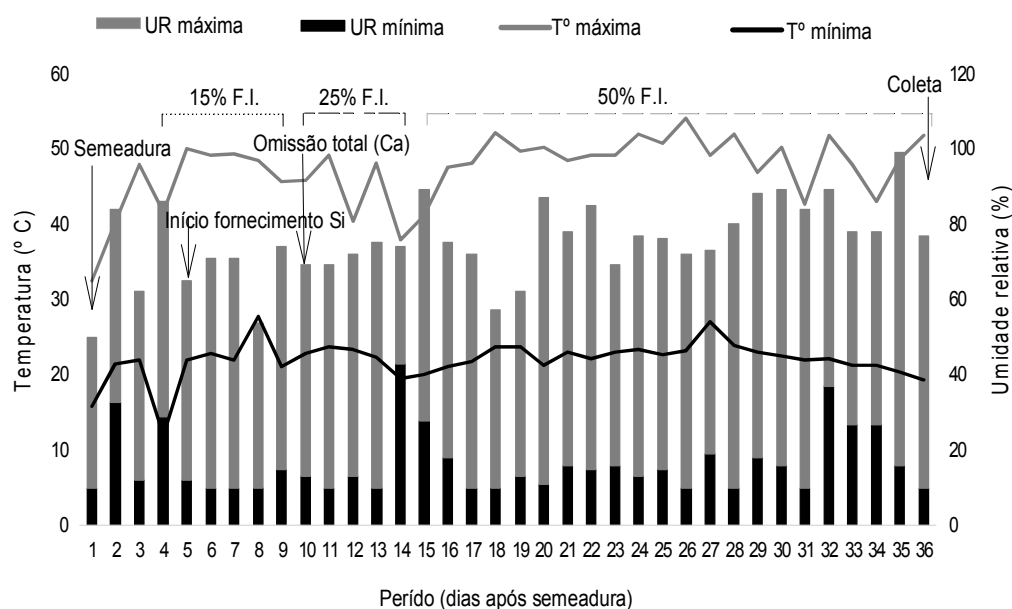


Figura 1. Temperaturas máximas e mínimas da estufa e umidade máxima e mínima, no interior da casa de vegetação após a semeadura das plantas de rúcula. Força iônica da solução nutritiva (F.I.).

A água utilizada para o preparo das soluções do experimento foi destilada e deionizada duas vezes e foi realizada análise de Si para aferir sua ausência e viabilizar seu uso no experimento.

Utilizou-se a solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), com alteração da fonte de ferro de Fe-EDTA para Fe-EDDHA e de Ca conforme os tratamentos (Tabela 1). Realizou-se diariamente o ajuste do valor do pH da solução nutritiva mantendo-a $5,5 \pm 0,2$ com o uso de solução de HCl ou NaOH, ambos a $1,0\text{ M L}^{-1}$.

Tabela 1. Composição da solução nutritiva com suficiência e deficiência de Ca 50% da concentração indicada.

Nutriente na Solução	Suficiência de Ca	Deficiência de Ca
	----- mM -----	-----
N	7,5	7,5
P	0,5	0,5
K	3,0	3,0
Ca	5,0	0,75
Mg	1,0	1,0
S	1,0	1,0
	-----µM-----	
B	23	23
Cu	0,15	0,15
Fe	45	45
Mn	6,3	6,3
Mo	0,05	0,05
Zn	0,65	0,65

Fontes de macronutrientes: CaCl_2 ; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; KCl ; KH_2PO_4 ; MgNO_3 ; MgSO_4 ; NH_4NO_3 e $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

Fontes de micronutrientes: CuCl_2 ; Fe-EDDHA; H_3BO_3 ; $\text{H}_2\text{MoO}_4\text{H}_2\text{O}$; $\text{MnCl}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ e ZnCl_2 .

As condutividades elétricas na solução nutritiva deficiente em Ca na ausência e na presença de Si foram 0,96 e 1,58 dS m^{-1} (25% da força iônica) e 1,78 e 2,99 dS m^{-1} , respectivamente (50% da força iônica). Quanto à solução nutritiva com suficiência em Ca, na ausência e presença de Si a condutividade foi de 1,06 e 2,34 dS m^{-1} (25% da força iônica) e 1,81 e 3,85 dS m^{-1} , respectivamente (50% da força iônica). A solução nutritiva foi aplicada duas vezes ao dia, no início da manhã e no final da tarde. Foram feitas duas pulverizações (20 de outubro de 2019 e 2 de novembro de 2019) com o inseticida sistêmico Confidence (5 mL L^{-1}) para o controle da mosca-branca e pulgão.

2.3. Análises

2.3.1. Índice de extravasamento de eletrólito

Em 9 de novembro de 2019, 32 dias após a semeadura das plantas de rúcula, coletou-se suas duas primeiras folhas totalmente desenvolvidas para a determinação do índice de extravasamento de eletrólitos celulares, por meio do método proposto por Dionisio-Sese e Tobita (1998), para avaliar os danos causados à integridade da membrana celular. Discos de 7,61 mm foram coletados de folhas colhidas, e depois imersos em um béquer contendo 20 mL de água deionizada, à temperatura

ambiente, por um período de duas horas. Feito isso, foi verificada a condutividade elétrica inicial (EC1), com um condutivímetro de bancada (medidor digital TDS-3). Posteriormente, as amostras foram então autoclavadas a uma temperatura de 120 ° C graus por 20 min, e após o resfriamento uma nova leitura foi realizada, a fim de obter sua condutividade elétrica final (EC2). O índice de extravasamento de eletrólitos foi determinado pela fórmula $EC1 / EC2 \times 100$.

2.3.2. Quantificação de carotenoides e de clorofila

Ainda no dia 9 de novembro de 2019, outros discos foram coletados das duas primeiras folhas recém-desenvolvidas, como forma de obter 0,025 a 0,030 g de matéria fresca das plantas, conforme metodologia proposta por Lichtenthaler (1987) para quantificação dos pigmentos fotossintéticos, com leituras a 663 nm para a clorofila a (Chl *a*), 647 nm para a clorofila b (Chl *b*) e 470 nm para carotenoides. Todas as leituras foram realizadas em espectrofotômetro (DU 600 Series) (Beckman Instruments INC, Fullerton, CA, EUA).

2.3.3. Eficiência do fotossistema II (Fv / Fm)

A eficiência quântica do fotossistema II-FSII (Fv/Fm) foi obtida pela verificação da fluorescência da clorofila usando um fluorímetro de clorofila (Modelo Os-30P) (Optisciences INC, Tyngsboro, MA, EUA). As medidas foram realizadas no período da manhã, entre as 7h e 8h, do dia 8 de novembro de 2019. Pinças foram colocadas na segunda folha completamente desenvolvida, por cerca de 30 minutos; após esse período, verificou-se a fluorescência máxima e variável, obtida por uma excitação causada por uma luz vermelha pulsante, em um procedimento que leva aproximadamente um segundo. A eficiência quântica do FSII foi determinada pelo cálculo da razão entre as fluorescências máxima e variável, de acordo com o método descrito por Lichtenthaler et al. (2005).

2.3.4. Ácido ascórbico

Coletou-se uma planta inteira para obtenção do teor de ácido ascórbico (AsA) por meio de titulometria com solução de 2,6 dicloro-fenol-indofenol de sódio (reativo

de Tillmans), e os resultados foram expressos em mg 100 g MF (matéria fresca) (AOAC , 1980).

2.3.5. Fenóis totais

A extração, leitura e determinação foram realizadas de acordo com a metodologia proposta por Singleton e Rossi (1965), em 10 de novembro de 2019, mediante a coleta de 0,1 g de folhas frescas das duas primeiras folhas totalmente desenvolvidas, transferidas para tubos de falcon de 15 mL cobertos com papel alumínio, diluídas em metanol concentrado em banho-maria a 25 °C durante três horas. Para a realização da reação colorimétrica, transferiu-se uma alíquota de 1 mL do extrato filtrado para outro tubo tipo Falcon de 15 mL coberto com papel alumínio, completando o volume com 10 mL de água e 0,5 mL de Folin-Ciocalteu 2 N, e mantido em repouso por três minutos. Em seguida, foi adicionado 1,5 mL de carbonato de sódio a 20% e novamente deixado em repouso por duas horas à temperatura ambiente, período após o qual foi realizada a leitura da amostra em espectrofotômetro (B442 Model) (MicroNal, São Paulo, SP, BR) (765 nm). As amostras controle foram elaboradas seguindo todos os procedimentos citados, com exceção do material fresco. Para zerar o equipamento, utilizou-se metanol. O conteúdo fenólico total foi calculado como ácido gálico equivalente (AGE), expresso em g AGE 100 g⁻¹.

2.3.6. Perda acumulada de matéria fresca

36 dias após a semeadura (13 de novembro de 2019) das plantas de rúcula, coletou-se as plantas, compondo amostras com 10 plantas por unidade experimental, armazenadas em ambiente com temperatura controlada (10 - 15 °C), pesadas em balança analítica no primeiro e quinto dias pós-colheita, a fim de obter-se a perda acumulada de matéria fresca (PAMF). Para o cálculo da PAMF, foi utilizada a fórmula proposta por Chitarra e Chitarra (2005), baseada na diferença de peso entre a matéria fresca inicial (primeiro dia) e a matéria fresca final (quinto dia), dividida pela matéria fresca inicial. O resultado é expresso em porcentagem (%).

2.3.7. Área foliar, matéria fresca e seca da parte aérea e matéria seca das raízes

Realizou-se a medição da área foliar, usando um medidor de área foliar (modelo L-31000C) (Li-COR INC, Lincoln, NE, EUA), em 13 de novembro de 2019. A parte aérea (folhas) de 22 amostras de plantas foi pesada, visando à obtenção da matéria fresca. Posteriormente, a parte aérea e a raiz foram lavadas em água corrente, posteriormente em solução de detergente neutro (0,1% v/v), solução de HCl (0,3% v/v), e novamente em água deionizada. Em seguida, foram secas em estufa de circulação forçada de ar ($65\pm 5^{\circ}\text{C}$) até atingir massa constante, obtendo-se a matéria seca.

2.3.8. Conteúdo de Ca e Si

As amostras secas foram moídas em moinho tipo Wiley (Modelo MA 340) (MARCONI, São Paulo, SP, BR) e posteriormente realizou-se determinação dos teores de Ca conforme metodologia descrita por Bataglia et al. (1983) e dos teores de Si a partir da digestão úmida conforme a metodologia descrita por Kraska e Breitenbeck (2010) e a leitura do elemento realizada por espectrofotômetro de absorção atômica como descrito por Korndörfer et al. (2004). Com base nos resultados encontrados para o conteúdo de Ca e Si, e também para a matéria seca, o acúmulo de Ca e Si nas folhas e raízes das plantas de rúcula foram calculados (Siddiqi e Glass, 1981).

2.4. Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F e, quando significativos, foram comparados pelo teste de t student, com probabilidade de 5%. Todas as análises estatísticas foram processadas no *software* estatístico SAS® (Cary, NC, EUA).

3. Resultados

3.1. O acúmulo de Ca e Si nas folhas e raízes da rúcula

O acúmulo de Ca na parte aérea e raízes da rúcula depende do fornecimento de Si e do Ca (Figura 2 A, B). O maior acúmulo de Ca na parte aérea e na raiz da rúcula com ou sem Si ocorreu quando cultivada em solução nutritiva suficiente de Ca (Figura 2 A, B). O acréscimo de Si na solução incrementou o acúmulo deste macronutriente apenas na parte aérea da solução deficiente em Ca. O maior acúmulo de Si na parte aérea e raiz da rúcula foi observado nas plantas que receberam o elemento benéfico na suficiência ou na deficiência de Ca (Figura 2 C, D).

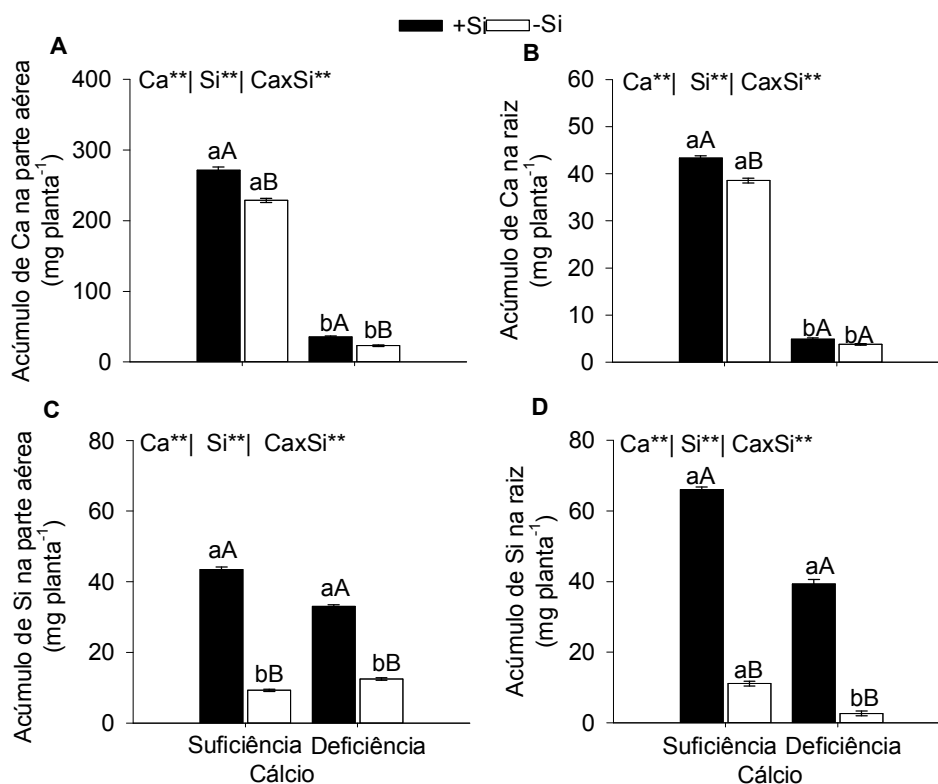


Figura 2. Efeito do fornecimento da solução nutritiva suficiente e deficiente de Ca na presença (+Si) e ausência de silício (-Si), no acúmulo de Ca na parte aérea (A) e raízes (B) e no acúmulo de Si na parte aérea (C) e raízes das plantas de rúculas (em vinte e três plantas por vaso). Barras pretas indicam a presença de Si, enquanto as brancas indicam sua ausência. * ($p \leq 0,05$) e ** ($p \leq 0,01$), respectivamente, pelo teste F. As letras minúsculas mostram diferenças para cálcio e letras maiúsculas para silício. A barra representa o erro padrão médio. $n = 7$.

3.2. Índice de extravasamento de eletrólitos, fenóis totais, carotenoides, teor de AsA, clorofila total e eficiência quântica do FSII

Os índices de extravasamento de eletrólitos, fenóis totais, carotenoides, ácido ascórbico, conteúdo de clorofila total (Chl *a+b*) e eficiência quântica do FSII das folhas de rúcula dependem da interação Ca e Si (Figura 3).

O uso da solução nutritiva deficiente em Ca, com ou sem Si, incrementou o extravasamento de eletrólitos (Figura 3 A) e diminuiu concentração de fenóis nas folhas da rúcula (Figura 3 B). A adição de Si na solução nutritiva deficiente e suficiente de Ca diminuiu o índice de extravasamento e aumentou a concentração de fenóis das folhas da hortaliça (Figura 3 A, B).

As plantas cultivadas em solução nutritiva deficiente de Ca sem o fornecimento de Si diminuíram a concentração de carotenoides (Figura 3 C) em comparação aos tratamentos com suficiência de Ca sem Si e diminui o teor de AsA nas folhas em relação à planta cultivada sob suficiência de Ca, na ausência ou na presença de Si (Figura 3 D). A adição de Si na solução nutritiva aumentou a concentração de carotenoides apenas no cultivo com deficiência de Ca e promoveu um aumento nos teores desta de AsA nas folhas das plantas de rúcula deficientes e suficientes de Ca.

As plantas cultivadas em solução nutritiva deficiente de Ca sem o fornecimento de Si diminuíram a concentração de Chl *a+b* (Figura 3 E), ao passo que o cultivo das plantas de rúcula com solução nutritiva com deficiência de Ca, com ou sem adição de Si, diminuiu a fluorescência da clorofila (Figura 3 F). A adição de Si na solução nutritiva aumentou a concentração de Chl *a+b* e a fluorescência da clorofila das folhas de rúcula deficiência ou suficiência de Ca.

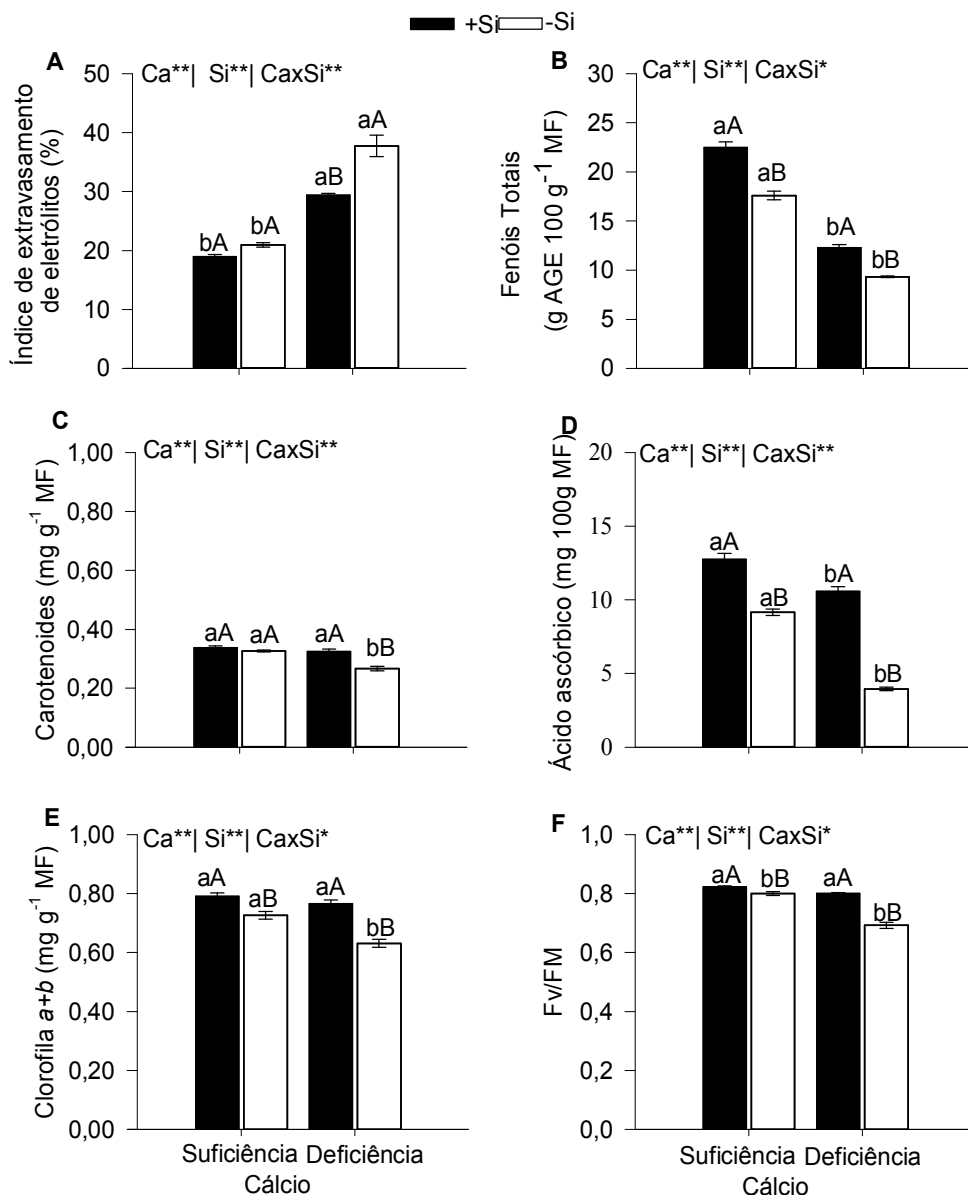


Figura 3. Efeito do fornecimento da solução nutritiva suficiente e deficiente de Ca na presença (+Si) e ausência de silício (-Si) no índice de extravasamento de eletrólitos (A), fenóis totais (B), carotenoides (C), teor de ácido ascórbico (D), clorofila total - *Chl a + b* (E) e eficiência quântica do FSII (F_v / F_m) (F) de plantas rúcula. Barras pretas indicam a presença de Si, enquanto as brancas indicam sua ausência. Matéria fresca (MF). * ($p \leq 0,05$) e ** ($p \leq 0,01$), respectivamente, pelo teste F. As letras minúsculas mostram diferenças para cálcio e letras maiúsculas para silício. As barras representam o erro padrão médio. $n = 7$.

3.3. Crescimento da planta, área foliar, matéria fresca e seca da parte aérea e raízes

Houve interação entre cálcio e silício para área foliar, matéria fresca da parte aérea, matéria seca da parte aérea e raiz. O cultivo de plantas em solução nutritiva com deficiência de Ca, com ou sem adição de Si, promoveu diminuição da área foliar, matéria fresca da parte aérea, matéria seca da parte aérea e raiz (Figura 4 A, B, C e D). A adição de Si na solução nutritiva de cultivo aumentou a área foliar, matéria fresca da parte aérea e matéria seca da parte aérea das plantas de rúcula cultivada sob deficiência ou suficiência de Ca (Figura 4 A, C). No entanto, o Si incrementou a matéria seca de raiz da hortaliça apenas quando cultivada em solução nutritiva sob suficiência de Ca. (Figura 4 D).

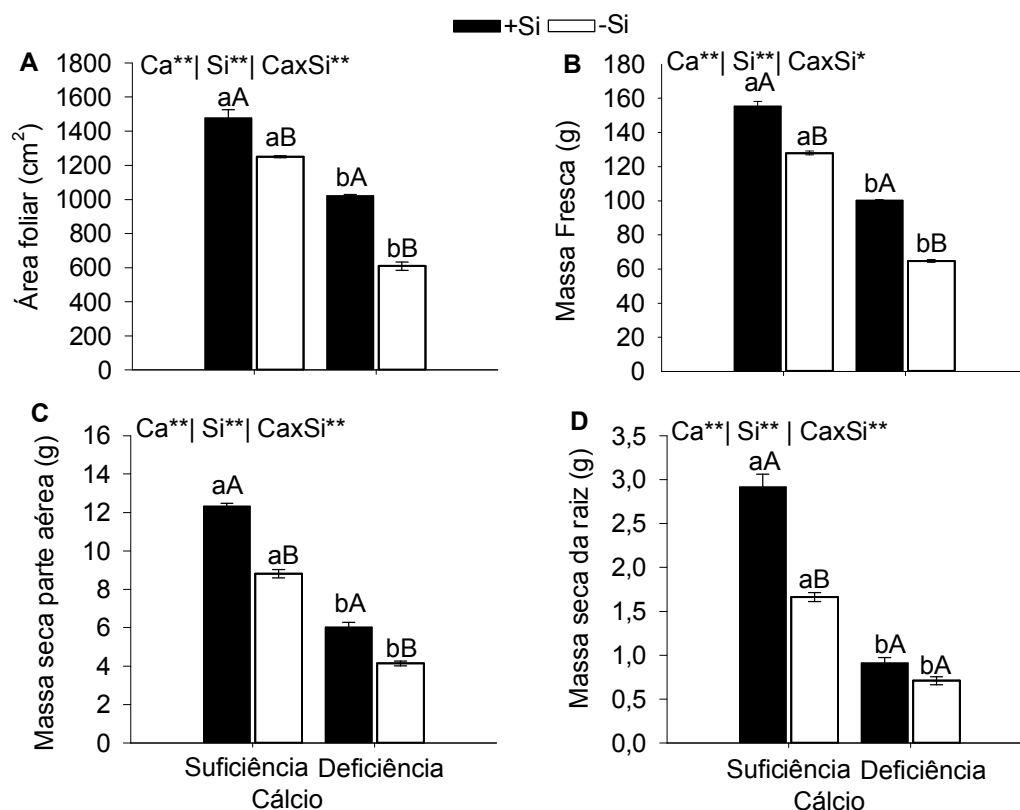


Figura 4. Efeito do fornecimento da solução nutritiva suficiente e deficiente de Ca na presença (+Si) e ausência de silício (-Si) na área foliar (A), matéria fresca da parte aérea (B), matéria seca da parte aérea (C) e matéria seca da raiz (D) de plantas de rúcula. Barras pretas indicam a presença de Si enquanto as barras brancas indicam

sua ausência. $^*(p \leq 0,05)$ e $^{**}(p \leq 0,01)$, respectivamente, pelo teste F. As letras minúsculas mostram diferenças para cálcio e letras maiúsculas para silício. As barras representam o erro padrão da média. $n = 7$.

3.4. Perda acumulada de matéria fresca

O percentual de perda acumulada da matéria fresca (PAMF) da rúcula obtida no primeiro e no quinto dias após a coleta das folhas dependem do Ca e do Si. As plantas de rúcula cultivadas em solução nutritiva sob deficiência de Ca, com ou sem adição de Si, tiveram maiores percentuais de PAMF nos dois dias de avaliação (Figura 5 A e B). A adição de Si na solução nutritiva diminuiu a PAMF das plantas no primeiro dia após a coleta das folhas apenas na deficiência de Ca (Figura 5 A). No entanto, no quinto dia essa diminuição da perda da matéria fresca ocorreu na suficiência e na deficiência deste macronutriente (Figura 5 B).

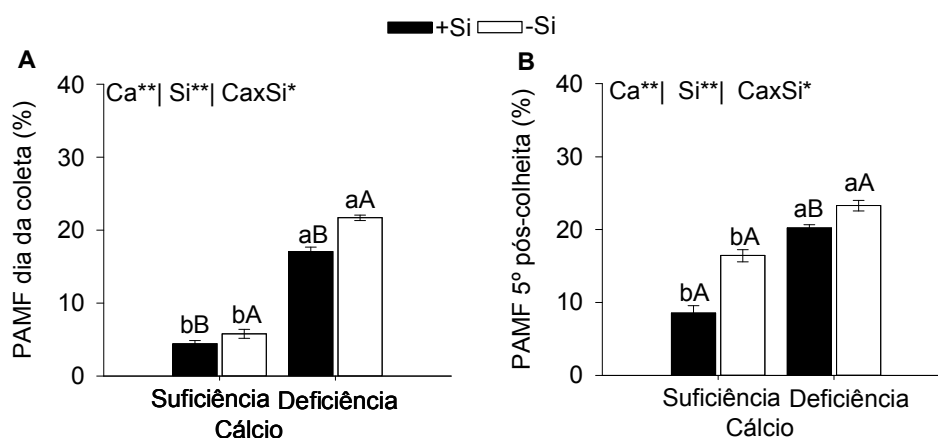


Figura 5. Efeito do fornecimento da solução nutritiva suficiente e deficiente de Ca na presença (+Si) e ausência de silício (-Si) na perda de matéria fresca no primeiro (A) e no quinto (B) dias após a colheita das folhas de rúcula. Barras pretas indicam a presença de Si enquanto as barras brancas indicam sua ausência. $^*(p \leq 0,05)$ e $^{**}(p \leq 0,01)$, respectivamente pelo teste F. As letras minúsculas mostram diferenças para cálcio e letras maiúsculas para silício. As barras representam o erro padrão da média. $n = 7$.

4. Discussão

As plantas são classificadas como não acumuladoras ($<5 \text{ g kg}^{-1}$), intermediárias ($5\text{-}10 \text{ g kg}^{-1}$) e acumuladoras de Si ($>10 \text{ g kg}^{-1}$) (Ma et al., 2001; Ma e Yamaji, 2006).

Observou-se que os teores de Si foliar atingiram $3,2 \text{ g kg}^{-1}$ (dados não apresentados) nas plantas que receberam Si e sem deficiência nutricional, indicando de forma inédita que a rúcula é uma planta não acumuladora de Si. Esse fato ocorreu neste experimento porque a adição de Si na solução nutritiva suficiente em Ca atingiu maior acúmulo deste elemento na raiz (66 mg por planta) do que na parte aérea (43 mg por planta) (Figura 2 C).

Isso ocorre porque essas plantas possivelmente não são eficientes em transportar o Si da solução externa para as células corticais, ou das células corticais para o xilema da raiz (Hernandez-Apaolaza, 2014), acumulando mais esse elemento na raiz do que na parte aérea.

Ficou claro que a adição de Si na solução nutritiva proporcionou incremento importante deste elemento na raiz e na parte aérea das plantas de rúcula, com ou sem deficiência nutricional de Ca. Portanto, fica constatado que plantas não acumuladoras de Si dispõem de mecanismos de absorção deste elemento, possivelmente de forma passiva. Soma-se a isto a metodologia rigorosa adotada no experimento a partir do fornecimento eficiente do elemento utilizando fonte solúvel com estabilizante em uma concentração ótima 2,5 mM de Si, diminuindo sua polimerização na solução e também devido à descontaminação da areia do vaso e da água ultrapura.

A deficiência de Ca em plantas de rúcula cultivadas em solução nutritiva deficiente deste elemento sem Si ficou evidenciada pelos prejuízos biológicos nas plantas. Nas plantas deficientes em Ca, é conhecida a perda da integridade da célula, pois esse nutriente forma os pectatos que constituem a lamela média e a parede celular (Olle e Bender, 2009). Além disso, a falta de Ca incrementa a atividade de enzimas pectolíticas, como a poligalacturonase (Olle e Bender, 2009), que degrada compostos orgânicos da planta (Taiz et al., 2017). Estes eventos somados podem ter aumentado a degradação da parede celular e da membrana, explicando esse aumento do índice de extravasamento de eletrólitos nas plantas de rúcula deficiente em Ca, fato também foi verificado em plantas de milho, segundo Kochanová et al. (2014).

Esse estresse oxidativo em plantas deficientes em Ca ficou agravado pela diminuição do poder de defesa antioxidante da planta de rúcula devido aos baixos teores dos fenóis totais (Figura 3 B) e ácido ascórbico (Figura 3 D). O resultado deste

estresse causou degradação de pigmentos, diminuindo o teor de clorofila *a+b* nas folhas da rúcula e na fluorescência da clorofila (Figura 3 E e F). A relação F_v/F_m é um importante indicador de dano fotoinibitório dos centros de reação do FSII em plantas sob estresse (Silva et al., 2012), pois diminui a eficiência da fotossíntese, prejudicando a produção de matéria fresca e seca da parte aérea e da raiz da rúcula, fato também relatado em folhas de espinafre deficiente de Ca (Chao et al., 2009).

A deficiência de Ca, além de diminuir o crescimento da planta, prejudicou a qualidade da folha após a colheita, pois houve incremento da PAMF nos dois dias de avaliação após a coleta, comprometendo o tempo de prateleira desta hortaliça (Figura 5). A perda de água do tecido vegetal em plantas deficientes de Ca já foi constatada em folhas de espinafre (Chao et al., 2009). Essa maior perda de água da folha possivelmente se deve ao aumento rápido do estresse oxidativo que induz danos nas membranas e na parede celular, como visto anteriormente. Além disso, a perda de água das folhas deficiente de Ca pode se dever ao aumento do fluxo transpiratório do tecido vegetal (Olle e Bender, 2009; Carmona et al., 2015). Estes eventos provocam diminuição do conteúdo de água do tecido (Chao et al., 2009) e da sua turgidez.

A adição de Si na solução nutritiva iniciou seus benefícios nas plantas deficiente em Ca por favorecer a absorção deste macronutriente, indicando um efeito sinérgico, constituindo um achado importante para essa espécie. No entanto, observou-se também efeito semelhante do Si na absorção de Ca nas plantas suficientes deste nutriente, mas isso foi evidenciado em outras espécies como em *Spartina densiflora* L. (Mateos-Naranjo et al., 2013) e em *Zea mays* L. (Kaya et al., 2006). Uma explicação possível para essa maior absorção de Ca mediante o fornecimento de Si pode ser o efeito bioquímico do Si em aumentar a atividade da H^+ -ATPase (Kaya et al., 2006), que gera gradiente eletroquímico nas membranas, favorecendo o transportador responsável pela absorção de Ca (Marschner, 1995; Liang, 1999; Liang et al., 2006). A alta temperatura durante o cultivo provavelmente foi responsável pelo aumento da taxa de transpiração nas plantas, fato já observado nas brássicas (Zou et al., 2017), provocando impacto no transporte de Ca e Si através do xilema da planta, consequentemente acumulando altos teores desses elementos nas folhas das plantas.

Além disso, a adição de Si na solução nutritiva atenuou estresse oxidativo nas plantas especialmente deficiente de Ca, pois diminuiu o índice de extravasamento de eletrólitos (Figura 3 A). O efeito do Si na diminuição da geração de espécies reativas de oxigênio responsável pelo estresse oxidativo nas plantas foi relatado em outras espécies, como alface (Galati et al., 2015), couve-flor e brócolis (Barreto et al., 2017), além de tomate (Alonso et al., 2020). Este efeito benéfico do Si ocorreu graças ao aumento do poder de defesa antioxidante da planta, dado o incremento dos compostos fenóis totais, ácido ascórbico e carotenoides nas folhas, fato inédito evidenciado em plantas de rúcula. Este efeito do Si no aumento do conteúdo de fenóis foi relatado em plantas de trigo (Mendonça et al., 2013), e no teor de ácido ascórbico foi verificado por outros autores em plantas de trigo (Ma et al., 2016) e repolho (Wu et al., 2017). Portanto, em plantas de rúcula o aumento da resposta antioxidante via três compostos não enzimáticos ficou mais evidenciado em plantas sob estresse nutricional.

O efeito do Si para diminuir estresse oxidativo em plantas com deficiência de Ca foi importante porque aumentou o teor de clorofila total (Figura 3 E) e, consequentemente, a eficiência da fluorescência da clorofila (Figura 3 F). Este fato nunca foi relatado anteriormente na literatura científica para rúcula. Este benefício fisiológico do Si também ocorreu em plantas sem deficiência nutricional, pois é conhecido que a melhoria da eficiência quântica da fluorescência da clorofila do FSII torna mais eficiente a transferência de energia luminosa para as clorofilas, favorecendo o metabolismo da planta (Kim et al., 2017; Taiz et al., 2017). Portanto, estes efeitos benéficos somados do Si nas plantas de rúcula atenuaram a deficiência de Ca e potencializaram seu crescimento sem essa deficiência nutricional, na medida em que foi incrementada a produção de matéria fresca de folhas e matéria seca de folhas e de raiz (Figura 4 C e D).

A adição de Si na solução nutritiva de cultivo da rúcula induziu indiretamente a biofortificação da rúcula, tendo incremento do teor de carotenoides, especialmente nas plantas deficiente em Ca e do ácido ascórbico, atingindo 12,6 e 10,6 mg/100g de matéria fresca na suficiência e na deficiência de Ca, respectivamente (Figura 3 C e D). Observa-se que a aplicação de aplicação de Si em plantas suficiente de Ca promoveu relevante biofortificação da rúcula com ácido ascórbico (12,6 mg/100g de

matéria fresca), na comparação com o indicado na literatura para a cultura (7,7 a 8,0 mg/100g de matéria fresca) (Bonasia et al., 2017). Esse aumento é importante porque estes compostos são fontes de vitaminas A (Lu e Li, 2008) e C (Rokayya et al., 2013), além do próprio Si, sendo reconhecidos como essenciais para o homem. Cabe destacar ainda que a aplicação de Si na rúcula sem deficiência nutricional propiciou também incremento do teor de fenóis totais (22,5 g AGE 100 g⁻¹ MF) (Figura 3 B) superior ao relatado na cultura sem aplicação deste elemento benéfico (10,1 g AGE 100 g⁻¹ MF) (Bonasia et al., 2017). Os compostos fenólicos e as vitaminas nos alimentos são bioativos importantes, tendo ação antioxidante, protegendo o ser humano ao diminuir risco de doenças e do envelhecimento pela manutenção da homeostase metabólica ou integridade da célula (Berger et al., 2012). Portanto, esse achado indica o potencial do Si na melhoria da qualidade nutricional da rúcula beneficiando a saúde do homem.

Por fim, evidenciamos que o Si diminuiu a perda de água das folhas frescas após a colheita logo no primeiro dia, especialmente em plantas deficiente em Ca e também no quinto dia nas plantas nos dois estados nutricionais da rúcula (Figura 5). Um estudo indicou também benefício do Si fornecido via pulverização foliar, tendo diminuição da perda de água do material fresco das hortaliças folhosas acelga e couve (Souza et al., 2019). Essa redução da perda de água do tecido pode ser explicada de forma semelhante ao Ca, uma vez que os dois elementos exercem papel biológico semelhante no sistema de defesa antioxidante e na estruturação dos tecidos. No caso do papel do Si no sistema antioxidante, seus benefícios já foram relatados, preservando a integridade das membranas, o que pode diminuir a perda de água do tecido. Soma-se a isto o fato de que a deposição do Si sob a cutícula forma uma dupla camada sílica (Ma, 2004), aumentando composto lignina-carboidratos na parede celular das células epidérmicas, levando em conta a maior lignificação (Inanaga et al., 1995). Estes efeitos podem diminuir a transpiração das folhas (Korndörfer et al., 2002) e a perda de água do material fresco.

A coleta das folhas das plantas suficientes em Ca, na presença e na ausência de Si na solução nutritiva, resultou em perdas de matéria fresca iguais a 5 e 6% no primeiro dia após a colheita e aumentou para 9 e 16% no quinto dia após a colheita, respectivamente. Essas plantas que receberam Si poderiam ser comercializadas

mesmo após cinco dias da colheita, pois, segundo Chitarra e Chitarra (2005), é indicada a comercialização de hortaliças folhosas com perdas da matéria fresca até 10%.

O achado inédito desta pesquisa discutido permite aceitar a hipótese, revelando os mecanismos de ação do Si nas plantas de rúcula com diferentes estados nutricionais de Ca. É proposto o fornecimento de Si na concentração de 2,5 mM na solução nutritiva de cultivo da rúcula, deficiente ou não de Ca, a fim de incrementar a produção com a biofortificação e a qualidade das folhas após a colheita, diminuindo as perdas de água.

5. Conclusão

A pesquisa revelou uma nova estratégia para mitigar a deficiência de Ca em plantas de rúcula, fornecendo Si na concentração de 2,5 mM, pois melhora o sistema de defesa antioxidante da planta, favorecendo a produção e a qualidade pós-colheita. Abrem-se, portanto, novas perspectivas sobre os benefícios do Si para aumentar a sustentabilidade de hortaliças folhosas, como a rúcula.

Agradecimentos: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

6. Referências

Alonso, T. A. de S., Ferreira Barreto, R., de Mello Prado, R., Pereira de Souza, J., Falleiros Carvalho, R. (2020) Silicon spraying alleviates calcium deficiency in tomato plants, but Ca-EDTA is toxic. **J. Plant Nutr. Soil Sci.** 1–6. <https://doi.org/10.1002/jpln.202000055>.

AOAC - Chemists, O. methods of analysis of the association of official analytical (1980) **Analytica Chimica Acta: Preface. Anal. Chim. Acta** 1018. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.05.035>.

Barbosa Filho, M. P., Snyder, G. H., Fageria, N. K., Datnoff, L. E., Silva, O. F. (2001)

Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Rev. Bras. Ciência do Solo** 25, 325–330. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832001000200009>.

Barreto, R. F., Schiavon Júnior, A. A., Maggio, M. A., de Mello Prado, R. (2017) Silicon alleviates ammonium toxicity in cauliflower and in broccoli. **Sci. Hortic.** (Amsterdam). 225, 743–750. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.08.014>.

Bataglia, O. C., Teixeira, J. P. F., Furlani, P. R., Furlani, A. M. C., Gallo, J. R. (1983) **Métodos de análise química de plantas**. Campinas.

Berger, R. G., Lunkenbein, S., Ströhle, A., Hahn, A. (2012) Antioxidants in food: Mere myth or magic medicine? **Crit. Rev. Food Sci. Nutr.** 52, 162–171. <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.499481>.

Bonasia, A., Lazzizera, C., Elia, A., Conversa, G. (2017) Nutritional, biophysical and physiological characteristics of wild rocket genotypes as affected by soilless cultivation system, salinity level of nutrient solution and growing period. **Front. Plant Sci.** 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00300>.

Carmona, V., Costa, L., Filho, A. (2015) Symptoms of Nutrient Deficiencies on Cucumbers. **Int. J. Plant Soil Sci.** 8, 1–11. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2015/20243>.

Chao, L., Weiqian, C., Yun, L., Hao, H., Liang, C., Xiaoqing, L., Fashui, H. (2009) Cerium under calcium deficiency-influence on the antioxidative defense system in spinach plants. **Plant Soil** 323, 285–294. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9937-9>.

Chitarra, M. I. F. and Chitarra, A. (2005) **Pós- colheita de Frutos e Hortaliças. Fisiologia e Manuseio.**, 2 ed. FAEPE, Lavras.

Dionisio-Sese, M. L., Tobita, S. (1998) Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Sci.** 135, 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00025-9).

Espíndola Trani, P., João Baptista, F., Rogério Sales, L. (1992) **Cultura da rúcula**. Embrapa Agropecuária Oeste; Embrapa Hortaliças., Campinas, SP : IAC ., p. 8.

Furlani, P. R. (1997) **Instruções para o cultivo de hortaliças de folhas pela técnica da hidroponia – NFT**.

Galati, V. C., Guimarães, J. E. R., Marques, K. M., Fernandes, J. D. R., Filho, A. B. C., Mattiuz, B. H. (2015) Aplicação de silício, em hidroponia, na conservação pós-colheita

de alface americana 'Lucy Brown' minimamente processada. **Cienc. Rural** 45, 1932–1938. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140334>.

Hernandez-Apaolaza, L. (2014) Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? a review. **Planta** 240, 447–458. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2119-x>.

Hoagland, D. R., Arnon, D. I. (1950) **The water-culture method for growing plants without soil**. Circ. Calif. Agric. Exp. Stn. 347.

Inanaga, S., Okasaka, A. (1995) Calcium and silicon binding compounds in cell walls of rice shoots. **Soil Sci. Plant Nutr.** 41, 103–110. <https://doi.org/10.1080/00380768.1995.10419563>.

Inanaga, S., Okasaka, A., Tanaka, S. (1995) Does silicon exist in association with organic compounds in rice plant? **Soil Sci. Plant Nutr.** 41, 111–117. <https://doi.org/10.1080/00380768.1995.10419564>.

Jain, V., Chawla, S., Choudhary, P., Jain, S. (2019) Post-harvest calcium chloride treatments influence fruit firmness, cell wall components and cell wall hydrolyzing enzymes of Ber (*Ziziphus mauritiana* Lamk.) fruits during storage. **J. Food Sci. Technol.** 56, 4535–4542. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03934-z>.

Kaya, C., Tuna, L., Higgs, D. (2006) Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. **J. Plant Nutr.** 29, 1469–1480. <https://doi.org/10.1080/01904160600837238>.

Kim, Y. H., Khan, A. L., Waqas, M., Lee, I. J. (2017) Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: A review. **Front. Plant Sci.** 8, 1–7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00510>.

Kochanová, Z., Jašková, K., Sedláková, B., Luxová, M. (2014) Silicon improves salinity tolerance and affects ammonia assimilation in maize roots. **Biol.** 69, 1164–1171. <https://doi.org/10.2478/s11756-014-0411-7>.

Korndörfer, G. H.; Pereira, H. S.; Camargo, M. S. de (2002) **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. Boletim Técnico, 1, Uberlândia.

Korndörfer, G. H., Pereira, H. S., Nola, A. (2004) **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Kraska, J. E., Breitenbeck, G. A. (2010) Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.** 41, 2075–2085. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>.

Liang, Y. (1999) Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. **Plant Soil** 209, 217–224. <https://doi.org/10.1023/A:1004526604913>.

Liang, Y., Zhang, W., Chen, Q., Liu, Y., Ding, R. (2006) Effect of exogenous silicon (Si) on H⁺-ATPase activity, phospholipids and fluidity of plasma membrane in leaves of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). **Environ. Exp. Bot.** 57, 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.05.012>.

Lichtenthaler, H. K. (1987) Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. **Methods Enzymol.** 148, 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1).

Lichtenthaler, H. K., Buschmann, C., Knapp, M. (2005) How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio RFd of leaves with the PAM fluorometer. **Photosynthetica** 43, 379–393. <https://doi.org/10.1007/s11099-005-0062-6>.

Lu, S., Li, L. (2008) Carotenoid metabolism: Biosynthesis, regulation, and beyond. **J. Integr. Plant Biol.** 50, 778–785. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2008.00708.x>.

Ma, D., Sun, D., Wang, C., Qin, H., Ding, H., Li, Y., Guo, T. (2016) Silicon Application Alleviates Drought Stress in Wheat Through Transcriptional Regulation of Multiple Antioxidant Defense Pathways. **J. Plant Growth Regul.** 35, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00344-015-9500-2>.

Ma, J. F. (2004) Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Sci. Plant Nutr.** 50, 11–18. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408447>.

Ma, J.F., Miyake, Y., Takahashi, E. (2001) Chapter 2 Silicon as a beneficial element for crop plants. **Stud. Plant Sci.** 8, 17–39. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80006-9](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80006-9).

Ma, J. F., Yamaji, N. (2006) Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends**

Plant Sci. 11, 392–397. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>

Marschner, H. (1995) **Mineral nutrition of higher plants**. 3 ed. Academic Press, London.

Mateos-Naranjo, E., Andrades-Moreno, L., Davy, A. J. (2013) Silicon alleviates deleterious effects of high salinity on the halophytic grass *Spartina densiflora*. **Plant Physiol. Biochem.** 63, 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.11.015>.

Mendonça, A. O., Tavares, L. C., Brunes, A. P., Monzón, D. L. R., Villela, F.A. (2013) Acúmulo de silício e compostos fenólicos na parte aérea de plantas de trigo após a adubação silicatada. **Biosci. J.** 29, 1154–1162.

Olle, M., Bender, I. (2009) Causes and control of calcium deficiency disorders in vegetables: A review. **J. Hortic. Sci. Biotechnol.** 84, 577–584. <https://doi.org/10.1080/14620316.2009.11512568>.

Ranjitha, K., Sudhakar Rao, D. V., Shivashankara, K. S., Roy, T. K. (2018) Integrating calcium chloride treatment with polypropylene packaging improved the shelf life and retained the quality profile of minimally processed cabbage. **Food Chem.** 256, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.012>.

Rokayya, S., Li, C. J., Zhao, Y., Li, Y., Sun, C. H. (2013) Cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) phytochemicals with antioxidant and anti-inflammatory potential. **Asian Pacific J. Cancer Prev.** 14, 6657–6662. <https://doi.org/10.7314/APJCP.2013.14.11.6657>.

Siddiqi, M. Y., Glass, A. D. M. (1981) Utilization index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **J. Plant Nutr.** 4, 289–302. <https://doi.org/10.1080/01904168109362919>.

Silva, P. P., Soares, L., Da Costa, J. G., Da Silva Viana, L., De Andrade, J. C. F., Gonçalves, E. R., Dos Santos, J. M., De Souza Barbosa, G. V., Nascimento, V. X., Todaro, A. R., Riffel, A., Grossi-De-Sa, M. F., Barbosa, M. H. P., Sant'ana, A. E. G., Neto, C. E. R. (2012) Path analysis for selection of drought tolerant sugarcane genotypes through physiological components. **Ind. Crops Prod.** 37, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.11.015>.

Singleton, V. L., Rossi, J. A. (1965) Colorimetry of Total Phenolics with

Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. **Am. J. Enol. Vitic.** 16, 144–158.

Souza, J. Z., de Mello Prado, R., Silva, S. L. de O., Farias, T. P., Neto, J. G., Souza Junior, J. P. de (2019) Silicon Leaf Fertilization Promotes Biofortification and Increases Dry Matter, Ascorbate Content, and Decreases Post-Harvest Leaf Water Loss of Chard and Kale. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.** 50, 164–172. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1556288>.

Souza, L., Rodrigues, M., Pacheco Silva, M., Silva, G., Cecilio Filho, A. (2011) **Caracterização de sintomas de excesso de micronutrientes e deficiência de macronutrientes em rúcula** 2, 3932–3939.

Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., Murphy, A. (2017) **Fisiologia vegetal**, 6th ed. Artmed, Porto alegre.

White, P. J., Broadley, M. R. (2003) **Calcium in plants**. *Ann. Bot.* 92, 487–511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>.

Wu, Z., Liu, S., Zhao, J., Wang, F., Du, Y., Zou, S., Li, H., Wen, D., Huang, Y. (2017) Comparative responses to silicon and selenium in relation to antioxidant enzyme system and the glutathione-ascorbate cycle in flowering Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis*) under cadmium stress. **Environ. Exp. Bot.** 133, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.09.005>.

Yan, Y., Wei, C.L., Zhang, W.R., Cheng, H.P., Liu, J. (2006) Cross-talk between calcium and reactive oxygen species signaling. **Acta Pharmacol. Sin.** 27, 821–826. <https://doi.org/10.1111/j.1745-7254.2006.00390.x>.

Zou, M., Yuan, L., Zhu, S., Liu, S., Ge, J., Wang, C. (2017) Effects of heat stress on photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of a heat-sensitive and heat-tolerant cultivar of wucan (*Brassica campestris* L.). **Acta Physiol. Plant.** 39. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2319-z>.