

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**SILÍCIO NA MODIFICAÇÃO DA ESTEQUIOMETRIA C:N:P,
EFICIÊNCIA NUTRICIONAL, PRODUTIVIDADE E
BIOFORTIFICAÇÃO DA QUINOA**

Luis Felipe Lata Tenesaca

Engenheiro Agrônomo

2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**SILÍCIO NA MODIFICAÇÃO DA ESTEQUIOMETRIA C:N:P,
EFICIÊNCIA NUTRICIONAL, PRODUTIVIDADE E
BIOFORTIFICAÇÃO DA QUINOA**

Luis Felipe Lata Tenesaca

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientadora: Profa. Dra. Marisa de Cássia Piccolo

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

L351s

Lata-Tenesaca, Luis Felipe

Silício na modificação da estequiometria C:N:P, eficiência
nutricional, produtividade e biofortificação da quinoa / Luis Felipe
Lata-Tenesaca. -- Jaboticabal, 2021

61 p. : tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Renato de Mello Prado

Coorientadora: Marisa de Cássia Piccolo

1. Biofortificação. 2. Chenopodium quinoa. 3. Elemento benéfico. 4.
Formas de aplicação. 5. Qualidade dos produtos. 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: SILÍCIO NA MODIFICAÇÃO DA ESTEQUIOMETRIA C:N:P, EFICIÊNCIA NUTRICIONAL, PRODUTIVIDADE E BIOFORTIFICAÇÃO DA QUINOA

AUTOR: LUIS FELIPE LATA TENESACA

ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

COORDINADORA: MARISA DE CÁSSIA PICCOLO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre 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. HÉCTOR DANIEL BERTERO (Participação Virtual)
Universidad de Buenos Aires-UBA / Buenos Aires/AR

Prof. Dr. RAFAEL FERREIRA BARRETO (Participação Virtual)
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul/UFMS / Chapadão do Sul/MS

Jaboticabal, 19 de fevereiro de 2021

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Luis Felipe Lata Tenesaca, nasceu em 07 de março de 1993 na cidade de Guayaquil, Equador. Possui título de Técnico em Agropecuária (2010) pelo Colégio Técnico Agropecuario “Camilo Ponce Enriquez”, e graduação em Engenharia Agrônômica (2015) pela Universidad Técnica de Machala (UTMACH). Em março de 2016, começou um emprego no Ministerio de Agricultura y Ganadería do Equador, participando em projetos de extensão para o desenvolvimento produtivo de produtores de banana. Em março de 2019, ingressou no curso de mestrado no Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal), na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Câmpus de Jaboticabal, sob orientação do Prof. Dr. Renato de Mello Prado. Em março de 2020, iniciou o curso de Especialização em Solos e Nutrição de Plantas na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (USP). Atualmente, faz parte do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da Unesp (GENPLANT), atuando em pesquisas na área de nutrição de plantas, trabalhando com o uso do silício na modificação de eficiência de nutrientes, mitigador de desordem nutricional e biofortificação de grãos de quinoa com Si e Fe.

“La vida es una obra de teatro que no permite ensayos... Por eso, canta, ríe, baila, llora y vive intensamente cada momento de tu vida... antes que el telón baje y la obra termine sin aplausos”.

Charles Chaplin

“E quando você menos espera, a vida te vira do avesso, e você descobre que o avesso é o seu lado certo”.

Caio Fernando Abreu

À memória de John, a sua lembrança diária é a maior
motivação dos meus dias. Aos meus anjos nesta terra,
Luis, Rosa e Amada, meus maiores exemplos de
superação de vida e dedicação.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Eu acredito plenamente na existência de um Deus que me viu com olhos bondosos. Nos últimos anos, passei por situações difíceis, mas quando olho para trás, posso entender a essência do porquê as coisas aconteceram e compreender seu verdadeiro plano para mim.

Eu sou o que sou por causa de minha família. “O melhor presente que eu posso deixar para meus filhos é a educação, uma formação de qualidade”, foram as palavras do meu pai Luis, que me deixou quando eu tinha 18 anos. Suas palavras sempre foram minha inspiração diária e talvez ele nunca tenha imaginado que eu iria chegar tão longe. Meu avô representa uma das minhas maiores forças, e sua crença no meu potencial, seus ensinamentos e seu amor pela agricultura e o campo fizeram com que eu goste do mesmo caminho e termine apreciando minha carreira profissional. *Para eles, gracias!*

A vida deu-me o privilégio de ter mais de uma mãe: minha mãe Anabel, que me criou desde criança, tornou-se meu suporte em todo momento, e mesmo que a vida nos mantivesse separados por muito tempo, sempre apoiou e aplaudiu minhas conquistas. Minha avó e mãe, que me deixou no início de meu mestrado, sempre tornou minha vida mais fácil e cheia de coragem para lidar com as adversidades. Quero agradecer a minha tia, que foi como minha mãe. Ela foi um dos meus melhores presentes neste mundo, minha mentora e anjo que sempre tem orgulho de mim lá do céu. *Para elas, gracias!*

Meu amigo de infância e da vida, foi meu irmão John. John deixou-me no início de meu mestrado, e sua ausência cavou fundo em meu coração. Juntos nós passamos por situações muito difíceis, desde termos que viver sem nossos pais e termos que cuidar um do outro. Meu irmão mostrou-me que a vida é menos complexa do que parece e que sempre haverá um motivo para comemorar e ser feliz. *Para meu irmão, gracias!*

Algumas pessoas passam a vida procurando seu lugar no mundo, mas eu soube que havia encontrado o meu quando conheci minha namorada Gabriela, que foi quem me abrigou quando episódios difíceis aconteceram em minha vida. Não só

agora, mas sempre, eu quero te abraçar e te oferecer meu amor todos os dias de minha vida. *Para ela, gracias!*

No decorrer de minha carreira, tive a oportunidade de ter grandes mestres como professores, que fizeram com que mesmo sendo um aluno comum consiga fazer coisas extraordinárias. Quero agradecer a meu amigo e professor da graduação Diego Villaseñor, por ter acreditado em meu potencial e motivado minha iniciativa por querer fazer mestrado. Em meu mestrado, tive a oportunidade de aprender muito com meu orientador, Prof. Dr. Renato de Mello Prado, que impulsou minha constância por me iniciar no mundo da ciência e por quem possuo uma grande consideração. *Para eles, gracias!*

Minha vida no Brasil tem sido agradável, até chegar ao ponto de sentir que estou em casa. Quero agradecer aos amigos que a UNESP e o Brasil me deram, como a Mariana, Lucas, Dalila, Gelza, Antônio, Isabela, Lívia, Kolima, Dilier, Alexander, Luís, João, Vinícius, José, Valeria, e muitos mais, que me acolheram e ajudaram-me durante esta fase. Aos meus amigos que ficam comigo à distancia e que se tornaram meus irmãos no Equador: Vital, Jeny, Samuel, Adrian, Henry, Juan. *Para eles, gracias!*

Agradeço aos colegas do grupo de pesquisa GENPLANT, que contribuíram para o meu aprendizado. Agradeço ao Departamento de Ciências da Produção Agrícola e a todos os funcionários que me ajudaram no desenvolvimento de meus trabalhos. A minha coorientadora, pela contribuição no desenvolvimento de minha pesquisa e a todos os professores que tive durante o mestrado e que contribuíram em minha formação. *Para eles, gracias!*

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

SUMÁRIO

Página

RESUMO.....	ii
ABSTRACT.....	iii
CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais	1
1 Introdução.....	1
2 Revisão de literatura.....	3
2.1 Importância da quinoa.....	3
2.2 Importância do silício para as plantas	4
2.3 Silício na estequiometria C:N:P e na eficiência de uso destes nutrientes.....	5
2.4 Formas de aplicação de silício.....	7
2.5 Biofortificação com silício.....	8
3 Referências	9
CAPÍTULO 2 – Silício modifica a estequiometria C:N:P, aumenta a eficiência nutricional e a produtividade da quinoa.....	15
Resumo	15
1 Introdução.....	16
2 Material e Métodos	18
2.1 Condições experimentais.....	18
2.2 Análises da planta.....	19
2.3 Análise estatística.....	20
3 Resultados.....	21
4 Discussão	26
5 Conclusão.....	31
6 Referências	31
CAPÍTULO 3 – Formas de aplicação de Si em quinoa e os mecanismos envolvidos para associar aumento da produtividade com a biofortificação dos grãos.....	36
Resumo	36
1 Introdução.....	37
2 Material e Métodos	39
2.1 Delineamento experimental e cultivo de quinoa.....	39
2.2 Análises da planta.....	40
2.3 Análise estatística.....	41
3 Resultados e Discussão	41
4 Conclusão.....	47
5 Referências.....	47

SILÍCIO NA MODIFICAÇÃO DA ESTEQUIOMETRIA C:N:P, EFICIÊNCIA NUTRICIONAL, PRODUTIVIDADE E BIOFORTIFICAÇÃO DA QUINOA

RESUMO – O silício (Si) é reconhecido por desempenhar papéis importantes no crescimento e na produtividade das plantas. Para compreender melhor o efeito do Si nas plantas, é importante considerar o estudo das relações estequiométricas C:N:P, a eficiência de uso de nutrientes e a biofortificação de grãos, mas essas informações não são conhecidas em plantas de quinoa. Para isso, realizou-se esta pesquisa, objetivando-se : (a) avaliar o efeito de diferentes concentrações de Si aplicadas via solução nutritiva na modificação das relações estequiométricas C:N:P e na eficiência de uso de nutrientes refletindo no crescimento e na produtividade da quinoa; (b) avaliar se o modo de aplicação de Si poderia incrementar sua absorção e a eficiência nutricional de N e P, os teores de compostos fenólicos na parte aérea das plantas de quinoa e incrementar a produtividade e a biofortificação dos grãos com Si e ácido ascórbico. Foram desenvolvidos dois experimentos em plantas de quinoa cultivadas em sistema hidropônico. No primeiro experimento, os tratamentos corresponderam a quatro concentrações de Si (0; 1; 2 e 3 mmol L⁻¹) aplicadas via solução nutritiva, na forma de silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol. No segundo experimento, foi testada a concentração de 3 mmol L⁻¹ de Si nas formas de aplicação: foliar, radicular em solução nutritiva, combinada radicular mais foliar e o controle, sem Si. Ficou evidenciado que o fornecimento do Si promoveu declínio na concentração de C associado à maior absorção de N e P, diminuindo principalmente as relações C:N e C:P, favorecendo a eficiência do metabolismo do C e modulando a eficiência de uso de N e P para o acúmulo de biomassa. O fornecimento de Si radicular mais foliar promoveu a maior eficiência de uso de N e P, incrementando a produtividade e a biofortificação de grãos com Si e ácido ascórbico.

Palavras-chave: ácido ascórbico, *Chenopodium quinoa* Willd, eficiência nutricional, modos de aplicação, qualidade do grão, relações estequiométricas, silicato.

SILICON IN MODIFICATION OF STOICHIOMETRY C:N:P, NUTRITIONAL EFFICIENCY, PRODUCTIVITY AND BIOFORTIFICATION OF QUINOA

ABSTRACT – Silicon (Si) is recognized for playing important roles in plant growth and productivity. To better understand the effect of Si on plants, it is important to consider the study of stoichiometric C:N:P relationships, the efficiency of use of nutrients and the biofortification of grains, but this information is not known in quinoa plants. For this, this research was carried out aiming: (a) to evaluate the effect of different Si concentrations applied via nutritive solution in the modification of stoichiometric relationships C:N:P, efficiency of use of nutrients reflecting in the growth and productivity of quinoa ; (b) evaluate if the Si application method could increase its absorption and the nutritional efficiency of N and P, the levels of phenolic compounds in the aerial part of the quinoa plants and increase the productivity and the biofortification of the grains with Si and acid ascorbic. Two experiments were carried out on quinoa plants grown in a hydroponic system. In the first experiment, the treatments corresponded to four concentrations of Si (0, 1, 2 and 3 mmol L⁻¹) applied via nutritive solution, in the form of sodium silicate and potassium stabilized with sorbitol. In the second experiment, the concentration of 3 mmol L⁻¹ of Si in the application forms was tested: leaf, root in nutrient solution, combined root plus leaf and control, without Si. It was evidenced that the Si supply by promoting a decline in the C levels, associated with greater uptake of N and P, especially decreased the C:N and C:P ratios, favoring the C metabolism efficiency, and modulated the N and P use efficiency for biomass accumulation. The supply of more leafy Si root promoted the highest efficiency of use of N and P, increasing the productivity and the biofortification of grains with Si and ascorbic acid.

Key words: ascorbic acid, *Chenopodium quinoa* Willd, grain quality, modes of application, nutritional efficiency, silicate, stoichiometric ratios.

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1 INTRODUÇÃO

O silício (Si) é conhecido como um elemento benéfico devido a seus vários efeitos na melhoria do crescimento e na produtividade das culturas (Richmond e Sussman, 2003). Para isso, a absorção e o acúmulo de Si nos órgãos das plantas são indispensáveis na compreensão da capacidade de resposta das espécies à aplicação do elemento (Mitani e Jian, 2005). No entanto, em muitas espécies, incluindo a quinoa, ainda não é conhecida a habilidade da planta para absorver o Si e associar seus efeitos com atividades fisiológicas e nutricionais da planta.

A maioria dos estudos com Si indica que seu efeito benéfico no crescimento das plantas está relacionado à melhoria do teor de clorofila, mantendo as folhas mais eretas, aumentando a interceptação da luz e outros efeitos que, juntos, melhoram as trocas gasosas, especialmente a taxa fotossintética (Maghsoudi et al., 2016). Portanto, são importantes pesquisas que possam indicar outros benefícios do Si nas plantas. Neste sentido, é sabido que a homeostase dos nutrientes tem relação direta com o crescimento das plantas e suas respostas às mudanças no ambiente (Prado e Pereira, 2017). Portanto, novas abordagens do papel biológico do Si nas plantas relatam que o elemento benéfico pode modificar as concentrações de nutrientes, como nitrogênio (N) e fósforo (P), além do carbono (C), alterando a homeostase, a produção de biomassa e a produtividade das culturas (Neu et al., 2017; Xu et al., 2020).

Existem relatos de que o Si pode reduzir as concentrações de C nos tecidos vegetais, devido à substituição parcial de alguns compostos de C nas plantas (Klotzbücher et al., 2018). A deposição de Si, em forma de sílica, nas células epidérmicas, também pode alterar a transpiração das plantas (Mehrabanjoubani et al., 2015); portanto, a disponibilidade de N na planta pode ser influenciada pelo Si. Além disso, é possível que o Si aumente a absorção e a disponibilidade de P nas plantas, a partir da expressão de genes transportadores e de ácidos orgânicos que atuam na mobilização do nutriente (Kostic et al., 2017). Sendo assim, a absorção de Si na planta de quinoa, dependendo da quantidade, poderia resultar na alteração da eficiência de

uso e nas relações estequiométricas destes nutrientes, favorecendo o metabolismo da planta e, conseqüentemente, a produtividade.

Recentemente, a cultura da quinoa ganhou grande atenção mundial devido a seu potencial como fonte alimentar sustentável (Jaikishun et al., 2019). A quinoa possui propriedades nutricionais notáveis, que incluem elevado equilíbrio de aminoácidos essenciais e de antioxidantes benéficos à saúde humana (Gordillo-Bastidas et al., 2006). Neste contexto, a qualidade nutricional da quinoa poderia ser potencializada com aplicação de Si, para obter grãos biofortificados com o elemento, considerado essencial para o homem (Huang et al., 2020). Além disso, o Si poderia promover a produção de metabólitos secundários com propriedade antioxidante nas plantas, como os fenóis (Vega et al., 2019) e o ácido ascórbico (Souza et al., 2019).

É importante avançar nas pesquisas com biofortificação na quinoa, de modo que, além de aumentar o teor de nutrientes nos grãos e de melhorar a qualidade do alimento, também possa ser associado ao incremento de produtividade. Para isso, deve-se conhecer o modo de aplicação dos elementos para otimizar seus benefícios na planta. Nos estudos de biofortificação, tem sido feita a pulverização foliar diretamente aos órgãos reprodutivos, como flores e grãos em formação, havendo relatos de aumento das concentrações de Si em grãos de soja e da produtividade de grãos (Shwethkumari et al., 2017). Existem informações de que a aplicação do Si via radicular também promove aumento do Si nos órgãos de colheita, como em vagens de feijão-verde (Montesano et al., 2016) e nas folhas de hortaliças folhosas (Montesano et al., 2016).

Para ampliar o entendimento sobre as respostas da quinoa ao Si, é pertinente avaliar as seguintes hipóteses: (a) o fornecimento de Si na planta de quinoa modifica as relações estequiométricas C:N:P e melhora a eficiência de uso de nutrientes, refletindo na produção de biomassa e na produtividade; (b) a quinoa absorve o Si e pode ser potencializada quando utilizado o modo de aplicação via radicular, associada à foliar, comparada sua aplicação isolada; e ainda (c) a maior absorção de Si pela quinoa incrementará teores de compostos antioxidantes e a eficiência de absorção e uso de N e P pela planta, favorecendo o aumento da produtividade, associado com maior biofortificação dos grãos com Si e ácido ascórbico.

Para isto, objetivou-se: (a) avaliar o efeito de diferentes concentrações de Si fornecidas via solução nutritiva na modificação das relações estequiométricas C:N:P, teores e eficiência de uso de nutrientes refletindo no crescimento e na produtividade da quinoa; (b) avaliar se a aplicação de Si poderia incrementar sua absorção e a eficiência nutricional de N e P, os teores de compostos fenólicos na parte aérea das plantas de quinoa e incrementar a produtividade e a biofortificação dos grãos com Si e ácido ascórbico.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Os efeitos do silício (Si) nas plantas têm sido extensivamente estudados como um elemento benéfico, sendo a maioria associados à maior absorção e acúmulo de Si nos tecidos e sua influência no crescimento e desenvolvimento das culturas (Pontigo, 2015). No entanto, a grande maioria dos estudos foram realizados com espécies acumuladoras de Si ou sob condições de estresse, existindo informação limitada sobre o efeito deste elemento na quinoa. As respostas da quinoa ao Si, especialmente na estequiometria C:N:P, a eficiência nutricional, a biofortificação e a produtividade são consideradas nesta revisão:

2.1 Importancia da quinoa

A quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) é um recurso alimentar, ancestralmente cultivado na região andina da América do Sul, resistente a vários fatores abióticos (Jacobsen et al., 2003). Nos últimos anos, houve grande interesse pela cultura da quinoa, pois constitui uma fonte alimentar de alto valor nutricional, cada vez mais cultivada, apreciada e consumida em diferentes regiões do mundo.

Muitos estudos destacam a quinoa como o melhor alimento de origem vegetal para o consumo humano, pois, em comparação com a maioria dos cereais, apresenta um grande equilíbrio de aminoácidos essenciais, vitaminas e minerais (Dakhili et al., 2019; Silva et al., 2020), benéficos para a saúde humana. Trata-se de uma cultura valiosa não só pelo seu valor nutricional, mas também por sua composição de compostos bioativos, como compostos fenólicos e vitamina C, que podem variar entre espécies e ambientes de adaptação (Hirose et al., 2010; Koziol, 1992).

Por causa de seu atrativo nutricional e comercial, sua produção e seu consumo ampliaram-se em países que podem representar condições limitantes para seu desenvolvimento, mesmo sendo uma cultura que ostenta características de tolerância (Jacobsen et al., 2003). Várias pesquisas abordaram principalmente a tolerância ao estresse salino e à seca (Hinojosa et al., 2018; Parvez et al., 2020). Essa adaptabilidade permitiu que a quinoa seja considerada uma cultura promissora às culturas tradicionais. Neste sentido, estudos sobre a influência de elementos benéficos, como o Si, para potencializar as respostas fisiológicas e nutricionais, ainda precisam ser elucidados.

A cultivar BRS Piabiru é a primeira opção como cultivo granífero de quinoa, e sua inserção objetivou contribuir na diversificação dos sistemas produtivos no Brasil (Spehar et al., 2006). No entanto, sua produção ainda constitui valores irrelevantes, com poucos avanços produtivos. A adaptabilidade da quinoa às condições dos sistemas de produção depende da continuidade nos estudos sobre as bases fisiológicas e nutricionais da cultura, com uso de estratégias que objetivem promover o incremento da produtividade e, assim, conseguir diversificar sua produção.

2.2 Importância do silício para as plantas

O Si é o segundo elemento mais abundante na superfície terrestre e no solo, sendo absorvido pelas plantas na forma de ácido monossilícico $[\text{Si}(\text{OH})_4]$. Apesar de seu acúmulo nas plantas, equivalente ao dos elementos como cálcio, magnésio e fósforo, o Si não é considerado entre os elementos essenciais (Epstein, 2001).

A maioria dos efeitos do Si nas plantas têm sido associados a um maior acúmulo desse elemento, através de diferentes mecanismos envolvidos na absorção pelas raízes. As plantas são classificadas em acumuladoras ($>10 \text{ g kg}^{-1}$ de Si), acumuladoras intermediárias ($5 - 10 \text{ g kg}^{-1}$ de Si) e não acumuladoras ($<5 \text{ g kg}^{-1}$ de Si) (Mitani e Jian, 2005), através de três formas de absorção de Si: ativo, passivo e rejeitivo, respectivamente (Takahashi et al., 1990).

A translocação do Si pelo xilema, na mesma forma química que é absorvido para a parte aérea da planta, é facilitada pelo processo de transpiração. O elemento é depositado na parede celular da epiderme das folhas, na camada subcuticular e nos

espaços intercelulares. Devido à evaporação da água e seu transporte para outros tecidos, o ácido monossilícico condensa-se em forma de sílica gel polimerizada, não podendo ser redistribuído pela planta, tornando-se imóvel (Ma et al., 2011). O acúmulo de Si na parede celular, na forma de sílica amorfa, confere a esse elemento o efeito de proteção mecânica.

Diferentes mecanismos associados aos efeitos do Si nas plantas incluem a regulação do processo de transpiração (Fan et al., 2008), que tem sido explicado pelo fato da formação da dupla camada de sílica cuticular, que reduz a transpiração e regula a exigência de água pelas plantas. Além disso, nos processos fisiológicos e bioquímicos, diferentes trabalhos revelam uma associação indireta da aplicação de Si no incremento das taxas fotossintéticas e pigmentos (Maghsoudi et al., 2016) e no aumento da absorção e das concentrações de nutrientes nos tecidos (Yan et al., 2018). Assim, o Si melhora significativamente a aptidão natural e incrementa a produtividade das culturas.

2.3 Silício na estequiometria C:N:P e na eficiência de uso destes nutrientes

Uma abordagem para estudar as múltiplas concentrações entre os elementos de uma planta é focar nas relações estequiométricas, consideradas um importante indicador biológico para entender as respostas das plantas a mudanças no ambiente e sua interação (Prado e Pereira, 2017). Os elementos carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P) estão fortemente associados ao funcionamento bioquímico das plantas (Ågren et al., 2012), e seu equilíbrio geralmente altera a produção agrícola. Portanto, a relação C:N:P é um dos fatores mais significativos em estequiometria, pois estabiliza os diversos processos ecológicos e pode explicar muitos fenômenos da biologia das plantas (Sternner e Elser, 2002).

Nas plantas, as relações C:N e C:P constituem a capacidade de fixação fotossintética de C através do acúmulo de N ou P. Entretanto, alterações na relação N:P refletem nos mecanismos fisiológicos que determinam a eficiência com que o N e P são usados pelas plantas para seu crescimento (Güsewell, 2004; Zhang et al., 2013). Desse modo, uma relação C:N alta e N:P baixa são consideradas como limitadas em N, enquanto relações C:P e N:P altas correspondem, principalmente, à limitação de P (Huang et al., 2018). A compreensão das relações estequiométricas

destes três elementos encontra-se relacionada a seu uso eficiente pelas plantas, para promover seu crescimento.

A produção de biomassa tem sido um parâmetro importante nos estudos estequiométricos, pois depende em grande parte da disponibilidade de nutrientes nos tecidos das plantas (Güsewell, 2004). Até agora, estudos sobre a eficiência de uso de nutrientes focaram especialmente em N e P (Ye et al., 2014). No entanto, a presença de mecanismos de absorção e transporte de certos elementos, como o Si (Ma e Yamaji, 2006), sugere também sua influência na aptidão das plantas. Isso concorda com estudos que evidenciaram que o Si tem efeitos positivos na produção de biomassa em plantas gramíneas (Xu et al., 2020).

A disponibilidade de Si nos tecidos influencia os processos biológicos das plantas, que naturalmente apresentam níveis moderados a altos do elemento. O acúmulo de Si na forma de sílica é um composto que requer menos energia para formar-se em relação à síntese enzimática de compostos estruturais de C; portanto, o gasto energético nas plantas é reduzido (Raven, 1983). Esses compostos de Si podem substituir parcialmente os compostos de C, como a lignina e a celulose, influenciando assim a disponibilidade de C e modificando a estequiometria C:N:P, como encontrado anteriormente em trigo (Neu et al., 2017) e caníço (Brackhage et al., 2013).

A alteração na estequiometria C:N:P também é decorrência do efeito do Si nas concentrações de N e P. De acordo com a literatura, esses nutrientes podem ser influenciados através de interações complexas dentro das células vegetais pelo Si (Pontigo et al., 2015). Foi evidenciado que, na cultura de cana-de-açúcar, o Si pode regular a fotossíntese e a transpiração, promovendo a absorção de N (Frazão et al., 2020). Na cultura de trigo, foi demonstrado que o Si estimula a absorção de P, devido à regulação da expressão de genes transportadores e ao aumento da exsudação de moléculas orgânicas pelas raízes, devido ao fornecimento de Si (Kostic et al., 2017). As interações envolvendo o Si e os nutrientes C, N e P podem alterar as concentrações de elementos nas plantas, porém não há informações sobre o efeito do elemento na quinoa.

2.4 Formas de aplicação de silício

A capacidade de acúmulo de Si nos tecidos da planta, que promove efeitos benéficos, encontra-se associada às formas de fornecimento do elemento, isto é, radicular ou foliar. Diferentes trabalhos documentaram que maiores teores de Si nas partes comestíveis da planta, como os grãos, dependem do modo de aplicação do elemento.

A aplicação foliar de Si tem sido interesse de várias pesquisas pela sua eficiência, praticidade e emprego de concentrações menores (Figueiredo et al., 2010). Além disso, inúmeros estudos demonstraram que o uso de Si foliar altamente solúvel, na forma estabilizada, pode melhorar o estado nutricional e fisiológico das plantas, bem como promover a produtividade de grãos, em culturas como o trigo (Guével et al., 2007) e a aveia (Soratto et al., 2012).

Quando aplicado via radicular, o Si apresenta diferentes reações na solução as quais diferem de acordo com a concentração do elemento, com as mudanças de pH e presença de estabilizantes (Felisberto, 2018). Quando o elemento se encontra em concentrações acima de 3 mmol L⁻¹ na solução, desencadeia-se o processo de polimerização (Iler, 1979). Este processo consiste na formação de cadeias poliméricas de Si (McKeague e Cline, 1963) que, em contato com as plantas via radicular ou foliar, não são absorvidas.

O fornecimento de baixas concentrações de Si pode favorecer a absorção e o acúmulo de Si nas plantas, porém não existem trabalhos que evidenciem o efeito de diferentes formas de aplicação em quinoa. Além da melhor forma, é necessário determinar a concentração adequada de Si que promova maior resposta benéfica nas plantas e considerar o emprego de fontes solúveis que possam ampliar as respostas da quinoa à aplicação de Si.

Para acrescentar o grau de resposta da quinoa à aplicação foliar ou radicular, a utilização de silicato de sódio e de potássio estabilizado com sorbitol tem surgido como inovação. Esta fonte pode diminuir a polimerização do elemento na solução nutritiva. Além disso, o sorbitol, que atua como estabilizante, tem características umectantes que incrementam a permanência da gota na superfície foliar (Babiker e Duncan, 1974; D'Souza e Shegokar, 2016); portanto, além de reduzir a velocidade de

polimerização do Si, pode aumentar sua absorção por prolongar o tempo de contato da solução com a superfície foliar.

2.5 Biofortificação com silício

Entre os maiores desafios para enfrentar o progressivo aumento da população e a exigência por uma alimentação equilibrada, estão a demanda de cultivos com maior valor nutricional e que sejam mais produtivos (Roriz et al., 2020). Diante disso, é primordial atuar de maneira sustentável para fazer frente a esses desafios e para garantir a produção de alimentos com elevado teor nutricional. Diferentes estratégias têm sido promovidas para atingir maiores teores de nutrientes nos produtos colhidos (Rawat et al., 2013), porém tais técnicas constituem certas limitações econômicas e sociais.

Nos últimos anos, um novo conceito tem provocado grande interesse na busca de possibilitar o enriquecimento de nutrientes na planta e de reduzir o impacto das deficiências alimentares. A técnica de biofortificação, é uma abordagem sustentável que tem por objetivo aumentar os teores de nutrientes nas partes comestíveis de alimentos básicos, como os grãos, através de métodos transgênicos, melhoramento de plantas ou de práticas agronômicas (Díaz-Gómez et al., 2017). Esta última consiste na aplicação de elementos ou de fertilização e é a mais facilmente alcançável (Zhao e Mcgrath, 2009).

A biofortificação de plantas com Si refere-se ao fornecimento exógeno deste elemento, seja radicular seja foliar, tendo como objetivo a obtenção de cultivos biofortificados para o consumo humano (Montesano et al., 2016). É conhecido sobre a essencialidade do Si no ser humano (Farooq e Dietz, 2015); além disso, o Si poderia promover a produção de compostos antioxidantes, como o ácido ascórbico (Kim et al., 2017) e os fenóis (Vega et al., 2019).

As formas de aplicação radicular e foliar representam um mecanismo diferente de atuação para potencializar os efeitos nas plantas. Dependendo da capacidade de acúmulo da espécie, podem ser atingidos maiores ou menores teores de Si nos órgãos. Assim, diferentes trabalhos demonstraram que a aplicação radicular de Si facilitou a biofortificação do elemento em vegetais folhosos (D'Imperio et al., 2015),

feijão-verde (Montesano et al., 2016) e arroz (Kheyri et al., 2018). Em morango, foi demonstrado que esta planta é um bom alvo para a biofortificação de Si e para melhorar a qualidade de frutos (Valentinuzzi et al., 2018).

Além do fornecimento radicular, a aplicação foliar pode resultar em estratégia eficiente e econômica se for conduzida para obter culturas biofortificadas (Smoleń, 2012). Esta técnica tem sido mais atraente e amplamente discutida na perspectiva da biofortificação, levando ao aumento dos teores de elementos que são deficientes na alimentação humana (Rawat et al., 2013).

A maioria de pesquisas sobre a aplicação foliar de Si envolvem seu efeito como mitigador de estresses abióticos e bióticos, existindo informação limitada sobre seu papel em condições normais. Neste sentido, o fornecimento foliar de Si em cereais oferece uma forma prática de melhorar o enriquecimento dos grãos com este elemento (Ma et al., 2003), a absorção de nutrientes (Zia-Ur-Rehman et al., 2016), a produtividade e a qualidade de grãos (Ratnakumar et al., 2016). Em vegetais folhosos, como acelga e couve, a aplicação foliar de silicato de potássio aumentou o acúmulo de Si, promovendo a biofortificação, o crescimento e a qualidade dos vegetais (Souza et al., 2019).

Embora a quinoa seja uma cultura que confere muitos benefícios à saúde humana, existe informação escassa sobre a densidade e a concentração dos principais nutrientes limitantes em seus grãos e, particularmente, sobre os teores de elementos benéficos, como o Si. Um estudo sobre o efeito do Si em Chenopodiaceae, mesma família da quinoa, desvendou que é possível a obtenção de um alimento biofortificado com Si, através do fornecimento radicular do elemento (50 ou 100 mg L⁻¹ de Si) (D'Imperio et al., 2015), promovendo também a concentração de Si biodisponível na mineralização óssea (D'Imperio et al., 2017).

3 REFERÊNCIAS

Ågren, G. I.; Wetterstedt, J. Å. M.; Billberger, M. F. K., 2012. Nutrient limitation on terrestrial plant growth - modeling the interaction between nitrogen and phosphorus. **New Phytologist**, v.194, p.953–960.

Babiker, A. G. T.; Duncan, H. J., 1974. Penetration of bracken fronds by asulam as

influenced by the addition of surfactant to the spray solution and by pH. **Weed Research**, v.14, p.375–378.

Brackhage, C. et al., 2013. Silicon availability affects the stoichiometry and content of calcium and micro nutrients in the leaves of common reed. **Silicon**, v.5, p.199–204, 2013.

D'Imperio, M. et al., 2015. Silicon biofortification of leafy vegetables and its bioaccessibility in the edible parts. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.96, p.751–756.

D'Souza, A. A.; Shegokar, R., 2016. Polyethylene glycol (PEG): a versatile polymer for pharmaceutical applications. **Expert Opinion on Drug Delivery**, v.9, p.1257–1275.

Dakhili, S. et al., 2019. Quinoa protein: Composition, structure and functional properties. **Food Chemistry**, v.299, p. 125–161.

Souza, J. Z. et al., 2019. Silicon Leaf Fertilization Promotes Biofortification and Increases Dry Matter, Ascorbate Content, and Decreases Post-Harvest Leaf Water Loss of Chard and Kale. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 50, p.164–172.

Díaz-Gómez, J. et al., 2017. Biofortification of crops with nutrients: factors affecting utilization and storage. **Current Opinion in Biotechnology**, v.44, p.115–123.

Epstein, E., 2001. Chapter 1: Silicon in plants: Facts vs. concepts. **Studies in Plant Science**, v.8, p. 1–15.

Fan, B.; You, J.; Chen, Y., 2008. Study on the effect of sugarcane under the middle elements. **Mordern Agric. Sci. Technol**, v.11, p.173–174.

Farooq, M. A.; Dietz, K. J., 2015. Silicon as versatile player in plant and human biology: Overlooked and poorly understood. **Frontiers in Plant Science**, v 6, p.1–14.

Felisberto, G., 2018. **Silício na mitigação de estresse por deficiência de zinco em plantas de arroz e soja**. Unesp, Jaboticabal.

Figueiredo, F. et al., 2010. Pulverização foliar e fertirrigação com silício nos atributos físico-químicos de qualidade e índices de coloração do morango. **Ciência agrotecnologia**, v.34, p.1306–1311.

Frazão, J. J. et al., 2020. Silicon changes C:N:P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. **Scientific Reports**, v.10, p. 1–11.

Gordillo-Bastidas, E. et al., 2006. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd), from Nutritional Value to Potential Health Benefits: An Integrative Review. **J Nutr Food Sci**, v.6, p. 497.

Guével, M.; Menzies, J. G.; Belanger, E., 2007. Effect of root and foliar applications of soluble silicon on powdery mildew control and growth of wheat plants. **J. Plant Pathol**, v.119, p.429–436.

Güsewell, S., 2004. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance. **New Phytologist**, v.164, p. 243–266.

Hinojosa, L. et al., 2018. Quinoa abiotic stress responses: A review. **Plants**, v.7.

Hirose, Y. et al., 2010. Antioxidant properties and flavonoid composition of *Chenopodium quinoa* seeds cultivated in Japan. **Food Chemistry**, v.119, p.1300–1306.

Huang, J. et al., 2018. Changes in C:N:P stoichiometry modify N and P conservation strategies of a desert steppe species *Glycyrrhiza uralensis*. **Scientific Reports**, v.8, p. 1–9.

Huang, S. et al., 2020. Plant Nutrition for Human Nutrition: Hints from Rice Research and Future Perspectives. **Molecular Plant**, v.13, p. 825–835.

Iler, R., 1979. Solubility, polymerization, colloid and surface proteins, and biochemistry. In: **The chemistry of silica**. New York: Wiley Interscience.

Imperio, M. D. et al., 2017. Integrated in vitro approaches to assess the bioaccessibility and bioavailability of silicon-biofortified leafy vegetables and preliminary effects on bone. p.217–224.

Jacobsen, S. E.; Mujica, A.; Jensen, C. R., 2003. The resistance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to adverse abiotic factors. **Food Reviews International**, v.19, p. 99–109.

Jaikishun, S. et al., 2019. Quinoa: In perspective of global challenges. **Agronomy**, v. 9, p.1–15.

Kheyri, N. et al., 2018. Effect of different resources and methods of silicon and zinc application on agronomic traits, nutrient uptake and grain yield of rice (*Oryza sativa* L.). **Applied Ecology and Environmental Research**, v.16, p.5781–5798.

Kim, Y. H. et al., 2017. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: A review. **Frontiers in Plant Science**, v.8, p.1–7.

Klotzbücher, T. et al., 2018. Variable silicon accumulation in plants affects terrestrial carbon cycling by controlling lignin synthesis. **Global Change Biology**, v.24, p.183–189.

Kostic, L. et al., 2017. Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. **Plant and Soil**, v.419, p.447–455.

Koziol, M., 1992. Chemical Composition and Nutritional Evaluation of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). **Journal of Food Composition and Analysis**, v.5, p. 35–68.

Li, Z., 2018. Chuan et al. Impacts of silicon on biogeochemical cycles of carbon and nutrients in croplands. **Journal of Integrative Agriculture**, v.17, p.2182–2195.

Ma, J. et al., 2005. Genotypic variation in Si content of barley grain. **Plant Soil**, v.249, p.383–387.

Ma, J. F.; Yamaji, N., 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v.11, p. 92–397.

Ma, J. F.; Yamaji, N.; Mitani-Ueno, N., 2011. Transport of silicone from roots to panicles in plants. **Proceedings of the Japan Academy, Series B Physical and Biological Sciences**, v.87, p.377–385.

Maghsoudi, K.; Emam, Y.; Pessarakli, M., 2016. Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v.39, p.1001–1015.

Mckeague, J.; Cline, M., 1963. Silica in the soil. **Advances in Agronomy**, v.15, p.339–396.

Mehrabanjoubani, P. et al., 2015. Silicon affects transcellular and apoplastic uptake of some nutrients in plants. **Pedosphere**, v.25, p.192–201.

Mitani, N.; Jian, F. M., 2005. Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany**, v.56, p.1255–1261.

Montesano, F. F. et al., 2016. Green bean biofortification for Si through soilless cultivation: Plant response and Si bioaccessibility in pods. **Scientific Reports**, v.6, p.1–9.

Neu, S.; Schaller, J.; Dudel, E. G., 2017. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports**, v.7, p. 3–10.

Parvez, S. et al., 2020. Effect of salinity on physiological, biochemical and photostabilizing attributes of two genotypes of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) exposed to arsenic stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.187, p. 109814.

Pontigo, S. et al., 2015. Silicon in vascular plants: Uptake, transport and its influence on mineral stress under acidic conditions. **Planta**, v.242, p.23–37.

Prado, R.; Pereira, G., 2019. Ecological response to global change: changes in C:N:P stoichiometry in environmental adaptations of plants. In: **Plant Ecology - Traditional Approaches to Recent Trends**. p. 2–19.

Ratnakumar, P. et al., 2016. Effect of ortho-silicic acid exogenous application on wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought. **J. Funct. Environ. Bot.**, v.6, p.34–42.

Raven, J., 1983. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews**, v.58, p.179–207.

Rawat, N. et al., 2013. Biofortification of cereals to overcome hidden hunger. **Plant Breed**, v.132, p.437–445.

Richmond, K. E.; Sussman, M., 2003. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. **Current Opinion in Plant Biology**, v.6, p.268–272.

Roriz, M. et al., 2020. Legume Biofortification and the Role of Plant Growth-Promoting Bacteria in a Sustainable Agricultural Era. **Agronomy**, v.10, p.435–448.

Shwethkumari, U. et al., 2017. Effect of foliar application of silicic acid on growth, field and quality of soybean. In **Proceedings of the 7th International Conference on Silicon in Agriculture**, p.146, 2017.

Silva, P. M. et al., 2020. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): An overview of the potentials of the “golden grain” and socio-economic and environmental aspects of its cultivation and marketization. **Foods**, v.9, p.31.

Smoleń, S., 2012. Foliar nutrition: current state of knowledge and opportunities. **Advances in Citrus Nutrition**, v.45, p.41–58.

Soratto, r. . et al., 2012. Leaf applications of silicic acid to white oat and wheat. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, v.36, p.1538–1544.

Spehar, C. R.; Lorena, R.; Santos, D. B., 2006. Agronomic performance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd .) under two moisture regimes in a brazilian savanah soil. **Biosci. J.**, v.22, p.61–66.

Sterner, R.; Elser, J., 2002. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere. Princeton University Press.

Takahashi, E.; Ma, J. F.; Miyake, Y., 1990. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. **Comments on Agricultural and Food Chemistry**, v.2, p.2–122.

Valentinuzzi, F. et al., 2018. Assessment of silicon biofortification and its effect on the content of bioactive compounds in strawberry (*Fragaria × ananassa* 'Elsanta') fruits. **Acta Hortic.**, v.1217, p.307–312.

Vega, I. et al., 2019. Silicon improves the production of high antioxidant or structural phenolic compounds in barley cultivars under aluminum stress. **Agronomy**, v.9, p.1–15.

Xu, D. et al., 2020. Silicon addition improves plant productivity and soil nutrient availability without changing the grass:legume ratio response to N fertilization. **Scientific Reports**, v.10, p. 1–9.

Yan, G. Chao et al., 2018. Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. **Journal of Integrative Agriculture**, v.17, p. 2138–2150.

Ye, Y. et al., 2014. Carbon, nitrogen and phosphorus accumulation and partitioning, and C:N:P stoichiometry in late-season rice under different water and nitrogen managements. **Plos One**, v.9, p.102-115.

Zhang, Z. S. Et Al., 2013. Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in estuarine wetland soils: Influences of vegetation coverage, plant communities, geomorphology, and seawalls. **Journal of Soils and Sediments**, v.13, p.1043–1051.

Zhao, F. J.; McGrath, S. P., 2009. Biofortification and phytoremediation. **Current Opinion in Plant Biology**, v.12, p.373–380.

Zia-Ur-Rehman, M. et al., 2016. Chapter 2: Role of Silicon under Nutrient Deficiency. **Silicon in Plants**, p.29–46.

CAPÍTULO 2 – Silício modifica a estequiometria C:N:P, aumenta a eficiência nutricional e a produtividade da quinoa

Resumo

O silício, reconhecidamente, tem um efeito benéfico no crescimento e na produtividade das plantas. A este respeito, as relações estequiométricas C, N e P e a eficiência de conversão de nutrientes permitem identificar as interações entre elementos e compreender melhor o papel que o Si desempenha nas plantas. Como esses parâmetros ainda não são conhecidos em plantas de quinoa, este estudo teve como objetivo avaliar se o Si fornecido pela solução nutritiva é absorvido pela quinoa, modificando a estequiometria C:N:P e aumentando a eficiência nutricional e a produtividade da cultura. Os tratamentos foram constituídos por quatro concentrações de Si (0; 1; 2 e 3 mmol L⁻¹) fornecidas na solução nutritiva na forma de silicato de potássio e sódio estabilizado com sorbitol. Os resultados revelaram que o fornecimento do Si ao promover declínio na concentração de C, associado à maior absorção de N e P, diminuiu principalmente as relações C:N e C:P, favorecendo a eficiência do metabolismo do C e modulou a eficiência de uso de N e P para o acúmulo de biomassa. Esse aumento do desempenho nutricional e a maior eficiência no uso de C favoreceram diretamente a produtividade da quinoa. O estudo fornece descobertas valiosas ao evidenciar a importância biológica do Si na quinoa. A perspectiva futura é encorajar novos estudos em campo com essa espécie para ajustar o manejo da fertilização com silício em diferentes solos para potencializar a produtividade da quinoa em bases sustentáveis.

Palavras-chave: *Chenopodium quinoa* Willd, eficiência nutricional, relações estequiométricas, silicato.

1 INTRODUÇÃO

O silício (Si) apresenta abundância relativa (28,8%) na crosta terrestre, estando na forma de SiO_2 (Hans, 1995), mas nas plantas ele pode variar de 1 a 5% na massa seca, predominando também na forma de $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (Birchall, 1995). No entanto, os teores disponíveis deste elemento são relativamente baixos nos solos tropicais. Geralmente, as plantas eudicotiledôneas são consideradas acumuladoras intermediárias de Si em comparação com as altas taxas de acúmulo que atingem as monocotiledôneas (Kaur e Greger, 2019). Assim, espera-se que o Si possa ser absorvido pela quinoa, mas não é conhecido se a espécie é considerada ou não acumuladora deste elemento benéfico.

O Si é geralmente conhecido como um elemento benéfico quase essencial para várias plantas por causa de seus papéis na ciclagem de nutrientes dentro dos ecossistemas (Struyf et al., 2011), modificando a absorção, a eficiência de uso e a estequiometria de nutrientes, como o nitrogênio (N) e o fósforo (P), além do teor de carbono (C) nas plantas (Schaller et al., 2012; Pontigo et al., 2015; Neu et al., 2017; Hao et al., 2020). Diante disso, a estequiometria C:N:P é o fator mais investigado nas interações ecológicas, por ser esses nutrientes fortemente acoplados no funcionamento bioquímico e fisiológico das plantas (Güsewell, 2004; Sardans e Peñuelas, 2012).

Os baixos custos de energia durante a incorporação do Si no tecido da planta, em relação ao C, pode ser indicativo de que o Si poderia substituir parcialmente o C em alguns compostos orgânicos da planta (Schaller et al., 2012; Liu et al., 2020). Estudos anteriores sugerem que o incremento das concentrações de Si promovem declínio na concentração de C em arroz (Klotzbücher et al., 2018) e pastagens (Hao et al., 2020); enquanto, em plantas de trigo, o Si está envolvido no metabolismo do C e P com subsequentes efeitos na estequiometria de nutrientes (Neu et al., 2017) e em *Phragmites australis* no metabolismo do N e P (Schaller et al., 2012).

Essas diferenças do Si nas relações estequiométricas em diferentes espécies pode estar relacionado a distintos padrões de absorção destes nutrientes, pois dependem de genes que codificam transportadores definidos por fator genético. Soma-se a isso o fato da fonte do Si utilizada, tendo predomínio de dióxido de silício

pirogênico (Schaller et al., 2012; Neu et al., 2017), que é não solúvel, embora tenha tamanho reduzido de partículas, diferentemente de fontes solúveis como silicato de potássio e de sódio que, em solução, forma o ácido monossilícico, que é a forma absorvida pelas plantas (Kudryavtsev e Figovsky, 2016). Um estudo com cana-de-açúcar foi observado maior absorção de Si com uso da fonte solúvel do que na forma de dióxido de silício (nanossilica) (Santos et al., 2020). Assim, novas pesquisas com fonte solúvel de Si devem serem realizadas pois pode aumentar a absorção deste elemento pela planta em suas respostas fisiológicas e na estequiometria elementar.

As alterações na eficiência metabólica de C induzidas por Si podem melhorar a produção de esqueletos de C nas plantas, afetando o metabolismo e a eficiência nutricional de nutrientes, como N e P. Neste sentido, como o N e o P também formam parte de compostos orgânicos que compõem as plantas e diversas enzimas, como as transportadoras (Krouk e Kiba, 2020), e têm ação como fonte de energia, e consequentemente alteram a absorção e o acúmulo destes nutrientes. Além disso, o N está intrinsecamente relacionado à produtividade da cultura (Basra et al., 2014), enquanto desempenha um papel importante no processo fotossintético (Sun et al., 2016) e nas concentrações de nutrientes (Zahoor et al., 2014). Embora a interação do Si e do P nos processos fisiológicos seja duvidosa, pesquisas indicam que a disponibilidade de P aumentou devido ao efeito do Si na expressão de transportadores e na exsudação de ácidos orgânicos para mobilização de P nas raízes (Kostic et al., 2017). Assim, P e N, juntos, podem influenciar a produtividade e a produção de biomassa (Guignard et al., 2017).

A quinoa destaca-se como o vegetal mais completo contendo todos os aminoácidos e superando os cereais no teor de proteínas com base na matéria seca (Silva et al., 2020). Nos últimos anos, tem havido um interesse crescente na cultura da quinoa, pela qualidade reconhecida de seus grãos, propriedade que deve ser estimulada pelo fato de que se trata de uma cultura com centro de origem em regiões estressantes para crescimento vegetal, e portanto sendo tolerante a diferentes estresses (Hinojosa et al., 2018). Os mecanismos de defesa da planta podem estar associados com Si, daí surge a necessidade de estudos para verificar os efeitos biológicos do Si nesta espécie.

Os possíveis efeitos benéficos do Si são pouco conhecidos em plantas em que não se tem pesquisa com esse elemento (Ma e Yamaji, 2006). Devido aos vários efeitos do Si, a hipótese é que o fornecimento de Si na planta altere as relações estequiométricas C:N:P e melhore o teor e a eficiência de uso de nutrientes, refletindo na produção de biomassa e na produtividade das plantas de quinoa.

Diante do exposto, nosso estudo teve como objetivo avaliar se o Si, na forma solúvel, fornecida via raiz, é absorvido pela quinoa, altera a relação C:N:P e aumenta a eficiência nutricional e a produtividade da cultura.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Condições experimentais

O experimento foi desenvolvido em plantas de quinoa da cultivar BRS Piabiru (Spehar, 2006), cultivadas em sistema de cultivo hidropônico, em casa de vegetação da Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Jaboticabal, Brasil. Durante o período experimental, os valores máximo e mínimo de temperatura e umidade relativa foram registrados diariamente com um termoigrômetro (Figura 1). O experimento foi desenvolvido em blocos casualizados, com quatro tratamentos e cinco repetições. Foi usado como fonte de Si o silicato de sódio e o potássio estabilizado com sorbitol [Si=107,9 g L⁻¹; K₂O=16,44 g L⁻¹; Na₂O=60,7 g L⁻¹; pH=11,8], em quatro concentrações: 0 (Si-0), 1 (Si-1), 2 (Si-2) e 3 (Si-3) mmol L⁻¹ aplicadas via solução nutritiva. A concentração de K na solução nutritiva foi equilibrada usando cloreto de potássio, entre todos os tratamentos.

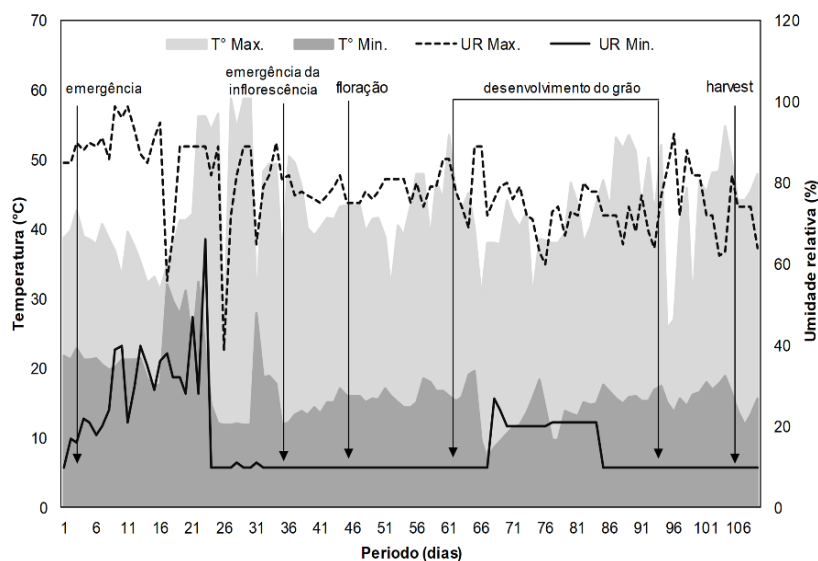


Figura 1. Condições experimentais na casa de vegetação durante o desenvolvimento do experimento. Temperatura máxima (T° Máx.), temperatura mínima (T° Mín.), umidade relativa máxima (UR Máx.) e umidade relativa mínima (UR Mín.).

Dez sementes de quinoa foram semeadas em cada vaso plástico contendo 6 dm³ de areia de textura média. A areia foi lavada com água corrente e, em seguida, com água deionizada e destilada (EMBRAPA, 2018). De acordo com o desenvolvimento das plantas, apenas uma planta por vaso foi mantida. Após a emergência, foi aplicado o Si mais a solução nutritiva (Hoagland et al., 1950), com substituição na fonte de Fe de Fe-EDTA para Fe-EDDHMA. O valor pH das soluções foi ajustado para $5,5 \pm 0,2$, com solução de HCl ou NaOH ($1,0 \text{ mol L}^{-1}$). O sorbitol da fonte utilizada desempenha um papel indispensável como estabilizador de Si em soluções aquosas, diminuindo o processo de polimerização em pH abaixo de 7. A concentração iônica da solução nutritiva foi incrementada durante o ciclo da cultura, iniciando-se com 10% durante os primeiros 10 dias após a emergência, e seguida para 25% no desenvolvimento foliar (até seis folhas verdadeiras), 50% desde a emergência da inflorescência, 80% na floração e 100% no desenvolvimento do fruto até o fim do experimento (Sosa-Zuniga et al., 2017).

2.2 Análises da planta

Quando as plantas atingiram a maturidade fisiológica, a biomassa foi separada em raiz, caule, folhas e grãos. Todos os tecidos das plantas foram lavados em água deionizada com solução detergente (0,1%), solução de HCl (0,3%) e água deionizada.

O material vegetal foi seco em estufa de circulação de ar forçado a $65 \pm 5^\circ\text{C}$ até atingir massa constante, e posteriormente determinou-se a massa da matéria seca.

A massa seca foi usada para medir a concentração de C e N, pelo método de combustão a seco (1000°C), utilizando um analisador elementar (LECO Truspec CHNS), calibrado com o padrão de trigo LECO 502-278 (C=45,00% e N=2,68%). As concentrações totais de P foram medidas usando o método colorimétrico de antimônio do molibdênio, seguindo os métodos descritos Bataglia et al., (1983). Para a determinação do teor de Si, foi realizada a digestão úmida, pela adição de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e hidróxido de sódio (NaOH), com a reação induzida em autoclave a 123°C . A leitura do teor de silício foi realizada por espectrofotômetro a 410 nm, pelo método de colorimetria com ácido clorídrico, ácido oxálico e molibdato de amônio (Korndörfer et al., 2004).

A partir das concentrações dos nutrientes no tecido da planta (g kg^{-1}) e da matéria seca (g por planta), o acúmulo dos elementos foi calculado em mg por planta . As relações estequiométricas C:N:P foram determinadas com as concentrações de cada elemento expresso em g kg^{-1} , nos diferentes órgãos da planta. Foi calculada a eficiência do uso de nutrientes na biomassa total produzida por unidade de nutrientes na planta, como: $[(\text{massa seca total da planta})^2 / \text{acúmulo de N e P na planta}]$ (Siddiqi e Glass, 1981).

2.3 Análise estatística

Após normalidade (teste Kolmogorov-Smirnov) e homogeneidade da variância (teste Shapiro-Wilk), todos os dados foram submetidos à análise de variância e, quando o teste F foi significativo ($p < 0,05$), os dados foram ajustados ao modelo de regressão polinomial linear ou quadrático, optando-se pelo modelo de maior coeficiente de determinação (R^2). O teste de correlação de Pearson foi realizado considerando o tamanho amostral $n=20$. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o SAS Version 9,1 software (SAS Institute, Cary, NC, USA). Os valores de resposta do log para os números foram calculados por $\ln$ dos valores médios (tratamento com Si/controlado), usando a seguinte fórmula (Hedges et al., 2019): $\ln [\bar{X}_{(\text{tratamento com Si})} / \bar{X}_{(\text{controlado})}] \pm (S^2_{(\text{tratamento com Si})} / n_{(\text{tratamento com Si})} \bar{X}^2_{(\text{tratamento com Si})} +$

$(s^2_{\text{(controle)}} / n_{\text{(controle)}} \bar{X}^2_{\text{(controle)}}]$. Se a taxa de resposta do ln for 0, os valores de tratamento com Si não diferem do controle. Se for inferior a 0, os valores de tratamento com Si são inferiores ao controle, e se a taxa de resposta do ln for maior que zero, o valor do tratamento com Si será maior que o controle.

3 RESULTADOS

Acúmulo de silício. O incremento das concentrações de Si causou aumento linear no acúmulo de Si na massa seca dos diferentes órgãos. Na concentração de 3 mmol L⁻¹, o acúmulo de Si variou de 175 a 104, 79 e 49 mg por planta, para folha, grãos, raiz e caule, respectivamente. Portanto, verifica-se na maior concentração de Si na solução nutritiva que o acúmulo de Si nos órgãos seguiu a seguinte ordem decrescente: folha > grão > raiz > caule (Figura 2).

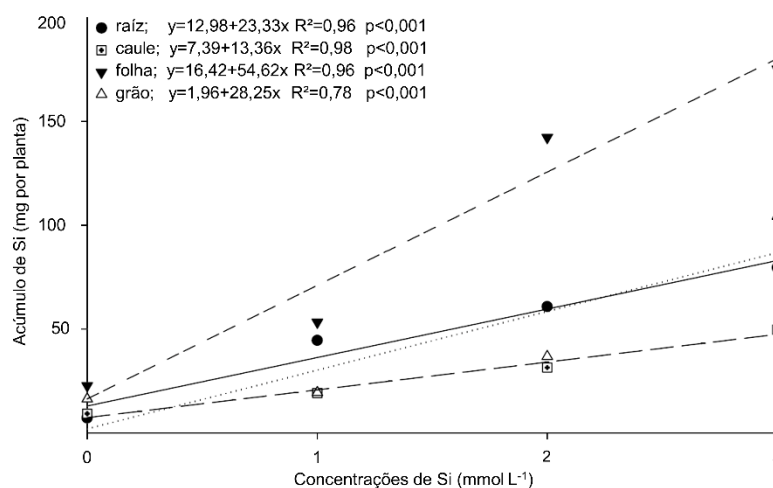


Figura 2. Acúmulo de Si na raiz, caule, folha e grãos das plantas de quinoa em função das concentrações de Si na solução nutritiva.

Concentrações de silício e de nutrientes. As concentrações de Si estudadas de 0; 1; 2 e 3 mmol L⁻¹ são referidas como Si-0, Si-1, Si-2 e Si-3, respectivamente. O fornecimento de Si na solução nutritiva aumentou significativamente ($p < 0,05$) a concentração de Si nos órgãos avaliados (Tabela 1).

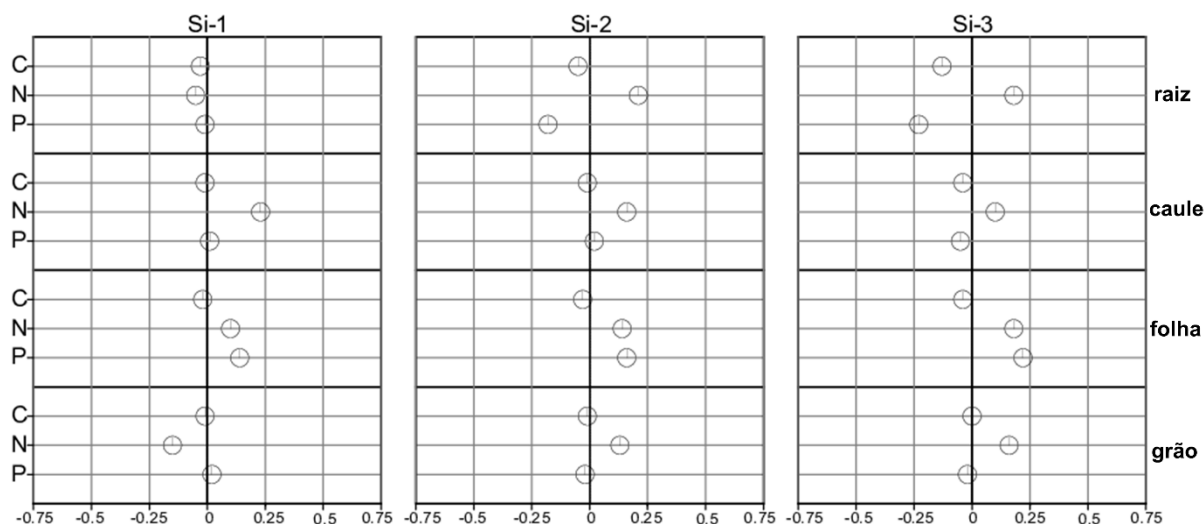


Figura 3. Alterações $[\ln (x-Si-L/x-Si-0) \pm \ln (SD-Si-L/SD-Si-0)]$, em que x é o valor médio da variável observada e L o nível de adição de Si; n=5] na concentração de carbono, nitrogênio e fósforo, em função das concentrações de Si na solução nutritiva.

A aplicação de Si afetou a concentração de carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P) de forma diferente, nos diferentes órgãos da planta (Figuras 3 e 4). As doses crescentes de Si, especialmente Si-3, diminuíram as concentrações de C na raiz, caule e folha, com declínios lineares de 11; 4 e 5%, respectivamente, à medida que a concentração de Si aumentou.

Os resultados indicaram que, para todos os órgãos da planta, com exceção do caule, as concentrações de Si-2 e Si-3 promoveram o aumento dos teores de N de 13 e 15%, respectivamente. O Si aplicado aumentou em até 19% o teor de P no tecido foliar, enquanto a disponibilidade de P diminuiu na raiz e no caule para Si-3, com os maiores níveis registrados em Si-0 (Figura 3, Tabela 1).

Tabela 1. Variações nas concentrações de Si, nutrientes e estequiometria de nutrientes no tecido vegetal da planta de quinoa (g kg^{-1}). Si-0, Si-1, Si-2 e Si-3 corresponde às concentrações de Si na solução nutritiva 0; 1; 2 e 3 mmol L^{-1} , respectivamente. Os dados são apresentados como médias $\pm$ EPM ($n=5$). Letras distintas indicam diferenças significativas entre os tratamentos de adição de Si (^{abcd} para $p<0,001$, ^{ef} para $p<0,05$). Letras iguais não indicam diferenças entre os tratamentos ($p>0,05$).

		Raiz	Caule	Folha	Graãos
Si	Si-0	3,04 $\pm$ 0,27 c	0,98 $\pm$ 0,06 c	2,08 $\pm$ 0,1 d	1,35 $\pm$ 0,04 c
	Si-1	12,22 $\pm$ 0,33 b	1,31 $\pm$ 0,02 b	3,70 $\pm$ 0,1 c	1,35 $\pm$ 0,04 c
	Si-2	14,53 $\pm$ 0,58 b	1,46 $\pm$ 0,04 b	8,33 $\pm$ 0,13 b	2,02 $\pm$ 0,04 b
	Si-3	27,07 $\pm$ 0,92 a	2,59 $\pm$ 0,07 a	9,35 $\pm$ 0,23 a	5,55 $\pm$ 0,12 a
C	Si-0	459,83 $\pm$ 2,49 a	440,74 $\pm$ 2,59 e	302,03 $\pm$ 4,32a	440,48 $\pm$ 2,34 a
	Si-1	445,23 $\pm$ 3,84 ab	436,06 $\pm$ 2,01 e	296,22 $\pm$ 3,80ab	434,01 $\pm$ 3,26 a
	Si-2	435,43 $\pm$ 3,19 b	435,22 $\pm$ 2,04 e	292,90 $\pm$ 2,22ab	434,53 $\pm$ 3,31 a
	Si-3	408,40 $\pm$ 3,07 c	424,09 $\pm$ 1,25 f	286,09 $\pm$ 1,57 b	442,37 $\pm$ 1,35 a
N	Si-0	18,13 $\pm$ 0,64 b	23,98 $\pm$ 0,37 a	43,68 $\pm$ 0,48 f	43,24 $\pm$ 0,17 ef
	Si-1	16,91 $\pm$ 0,31 b	25,65 $\pm$ 0,53 a	48,32 $\pm$ 0,88 ef	37,34 $\pm$ 2,23 f
	Si-2	21,82 $\pm$ 0,2 a	25,14 $\pm$ 0,14 a	50,16 $\pm$ 1,13 e	49,29 $\pm$ 2,69 e
	Si-3	21,03 $\pm$ 0,47 a	24,63 $\pm$ 0,27 a	52,33 $\pm$ 1,3 e	50,83 $\pm$ 1,09 e
P	Si-0	1,83 $\pm$ 0,02 a	1,77 $\pm$ 0,01 ef	6,45 $\pm$ 0,10 c	4,31 $\pm$ 0,02 ab
	Si-1	1,81 $\pm$ 0,04 a	1,79 $\pm$ 0,02 ef	7,41 $\pm$ 0,08 b	4,39 $\pm$ 0,01 a
	Si-2	1,53 $\pm$ 0,04 b	1,80 $\pm$ 0,02 e	7,42 $\pm$ 0,13 b	4,25 $\pm$ 0,03 bc
	Si-3	1,46 $\pm$ 0,02 b	1,69 $\pm$ 0,03 f	8,0 $\pm$ 0,01 a	4,22 $\pm$ 0,01 c
C:N	Si-0	25,39 $\pm$ 0,50 a	20,61 $\pm$ 0,12 a	6,92 $\pm$ 0,04 a	10,19 $\pm$ 0,06 ef
	Si-1	26,35 $\pm$ 0,36 a	15,92 $\pm$ 0,26 c	6,13 $\pm$ 0,1 b	11,79 $\pm$ 0,61 e
	Si-2	19,96 $\pm$ 0,20 b	17,32 $\pm$ 0,12 b	5,85 $\pm$ 0,15 b	8,95 $\pm$ 0,6 f
	Si-3	19,45 $\pm$ 0,34 b	17,97 $\pm$ 0,33 b	5,58 $\pm$ 0,16 b	8,72 $\pm$ 0,18 f
C:P	Si-0	252,0 $\pm$ 2,71 b	249,67 $\pm$ 2,82 a	46,88 $\pm$ 0,94 a	102,21 $\pm$ 0,79 ab
	Si-1	247,03 $\pm$ 3,60 b	244,49 $\pm$ 4,05 a	39,99 $\pm$ 0,93 b	99,19 $\pm$ 0,82 b
	Si-2	285,49 $\pm$ 6,89 a	241,94 $\pm$ 1,81 a	39,55 $\pm$ 0,90 b	102,22 $\pm$ 0,94 ab
	Si-3	280,32 $\pm$ 4,07 a	251,12 $\pm$ 4,09 a	36,36 $\pm$ 0,26 b	104,73 $\pm$ 0,43 a
N:P	Si-0	9,93 $\pm$ 0,17 b	12,11 $\pm$ 0,10 c	6,78 $\pm$ 0,11 a	10,03 $\pm$ 0,06 ef
	Si-1	9,38 $\pm$ 0,19 b	15,38 $\pm$ 0,27 a	6,52 $\pm$ 0,14 a	8,51 $\pm$ 0,50 f
	Si-2	14,31 $\pm$ 0,39 a	13,97 $\pm$ 0,14 b	6,76 $\pm$ 0,14 a	11,59 $\pm$ 0,62 e
	Si-3	14,44 $\pm$ 0,40 a	13,99 $\pm$ 0,32 b	6,54 $\pm$ 0,15 a	12,03 $\pm$ 0,26 e

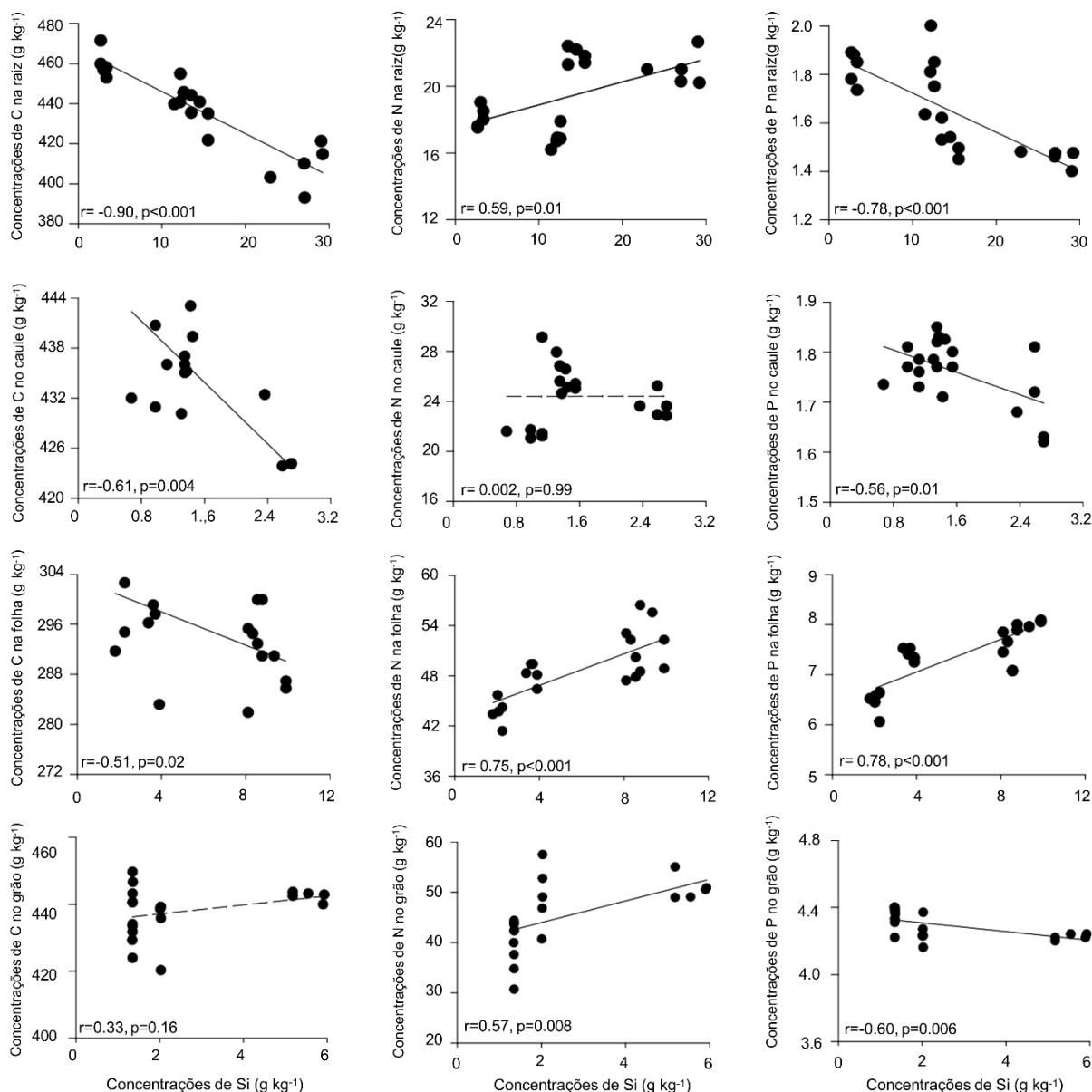


Figura 4. Correlação entre as concentrações de Si na raiz, caule, folha e grãos das plantas de quinoa e a concentração dos nutrientes (C, N e P). Coeficiente de correlação de Pearson (r) e valor de p são mostrados; correlação significativa ($p < 0,05$) indicada por linhas sólidas pretas e não significativa ($p > 0,05$) por linhas de pontos.

Respostas estequiométricas C:N:P. A aplicação de Si alterou significativamente todas as relações estequiométricas (C:N, C:P e N:P), distintamente, para cada órgão da planta (Figura 5, Tabela 1). As relações estequiométricas no tecido radicular, particularmente para Si-2 e Si-3, exibiram um ratio C:P (13 e 11%, respectivamente) maior e C:N (21 e 23%, respectivamente) menor, quando comparados ao controle (Si-0).

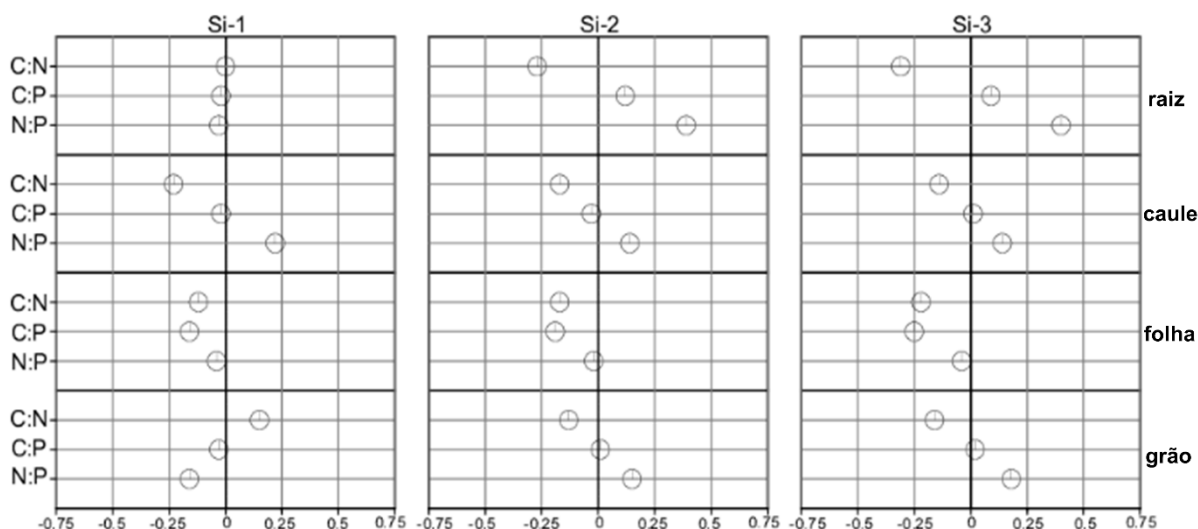


Figura 5. Alterações $[\ln (x\text{-Si-L}/x\text{-Si-0}) \pm \ln (\text{SD-Si-L}/\text{SD-Si-0})]$, onde x é o valor médio da variável observada e L o nível de adição de Si; n=5] na estequiometria de concentrações (C:N, C:P e N:P) em função das concentrações de Si na solução nutritiva.

Com relação ao caule, os ratios C:N e N:P diminuiram e aumentaram, respectivamente, em 12 e 16%. Além disso, nas folhas, houve pouca variação na relação C:N (7 a 6) e maior diminuição no ratio C:P (47 a 36) com o aumento das concentrações de Si. Nos grãos, houve a diminuição de 14% no ratio C:N entre a maior dose de aplicação de Si (Si-3) e o controle (Si-0). Em ordem decrescente, os maiores valores médios de C:N e C:P por órgão da planta foram raiz> caule> grãos> folha.

Eficiência de uso de nutrientes. A Figura 6 mostra que a eficiência de utilização de C, N e P aumentou, com um ajuste quadrático para as concentrações de Si fornecidas.

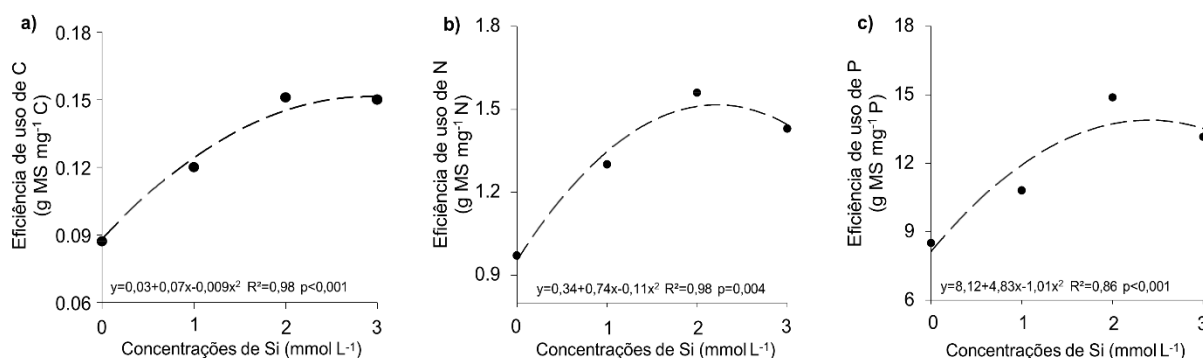


Figura 6. Eficiência de utilização de carbono (a), nitrogênio (b) e fósforo (c) em plantas de quinoa em função das concentrações de Si na solução nutritiva.

Produção de biomassa. A aplicação de Si afetou positivamente a produção de massa seca da parte aérea (caule e folhas), seguindo um ajuste quadrático e, conseqüentemente, aumento linear na biomassa de grãos de quinoa (Figura 7). A aplicação de Si aumentou a biomassa dos grãos em aproximadamente até 45%.

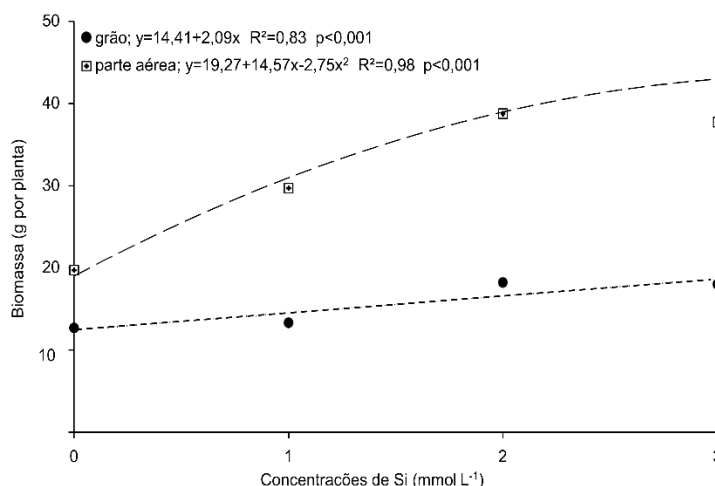


Figura 7. Biomassa da parte aérea e grãos de plantas de quinoa em função das concentrações de Si na solução nutritiva.

4 DISCUSSÃO

O Si fornecido na solução nutritiva via raiz aumentou o acúmulo de Si nas folhas de quinoa (Figura 2). Este fato concorda com relatos anteriores, em que houve aumento das concentrações de Si nas folhas de culturas como trigo (Neu et al., 2017), tomate (Al-aghabary et al., 2004) e cana-de-açúcar (Frazão et al., 2020), observadas para o Si aplicado via radicular, semelhante a este estudo. Deste modo, as plantas de quinoa mostraram transferir aproximadamente 43% do total do Si absorvido para as folhas, enquanto a concentração de raiz e caule foi mantida em níveis relativamente baixos. Esta maior quantidade de Si nas folhas, em relação à raiz, é um indicativo de que a quinoa não deva ser considerada uma planta não acumuladora de Si, pois ela acumula maior quantidade de Si na raiz em relação às folhas.

Os resultados indicam que o teor de Si nas folhas de quinoa variou de 2,1 a 9,4 g kg⁻¹ (Tabela 1), dependendo da concentração de Si aplicada, e esse teor abaixo de 10 g kg⁻¹ classifica a quinoa como uma planta intermediária para o acúmulo de Si (Takahashi et al., 1990). Isso está de acordo com estudos anteriores, onde a absorção

de Si pelas raízes de plantas eudicotiledôneas mostrou ocorrer de forma passiva na forma de ácido monossilícico, transportado no fluxo transpiratório e depositado de forma permanente como sílica hidratada amorfa no tecido foliar (Kaur e Greger, 2019). Desta forma, o acúmulo de Si na planta foi enriquecido principalmente no tecido foliar da quinoa, o que pode ser atribuído à intensidade da taxa de transpiração nas folhas e do equilíbrio entre a disponibilidade do Si na solução nutritiva e a demanda do elemento pela planta (Faisal et al., 2012). A variação no acúmulo de Si nos grãos de quinoa pode ser dependente, também, do nível de disponibilidade de Si na solução nutritiva. Além disso, tem sido sugerido que a variação nas concentrações de Si nos grãos pode ser controlada geneticamente (Ma et al., 2003; Neu et al., 2017). Para nosso conhecimento, este resultado inédito em relação à quinoa deve promover novas pesquisas com esta espécie e sua interação com o Si.

O aumento da disponibilidade de Si nos órgãos da quinoa altera as concentrações de C, N e P. Resultados semelhantes foram relatados para outras espécies de plantas em estudos que provaram que o Si controla parcialmente o fluxo de C enquanto altera as concentrações de N e P (Greger et al., 2018; Long et al., 2018; Hao et al., 2020). Os resultados indicam que o aumento do fornecimento de Si reduziu as concentrações de C na maioria dos órgãos da planta (Figura 4), representando uma correlação negativa entre as concentrações de Si e C. O reduzido teor de C nos tecidos pode indicar que o Si incorporado nos tecidos vegetativos substitui de forma adequada parte do C nos compostos orgânicos da parede celular, como a lignina e a celulose (Schoelynck et al., 2010; Schaller et al., 2012). O custo energético para incorporação de Si em compostos estruturais é menor do que a inclusão de mais um C em compostos orgânicos, devido à permeabilidade intrínseca das bicamadas lipídicas (Raven, 1983), o que contribui, também, para o melhor crescimento da planta. Além disso, o declínio das concentrações de C em diferentes órgãos da planta, não somente tem sido confirmado sob condições normais de cultivo, mas também em plantas que cresceram em condições de estresse abiótico, como salinidade (Hurtado et al., 2020; Liu et al., 2020) e déficit hídrico (Teixeira et al., 2020), que induzem maior gasto energético da planta, e o Si pode atenuar esse consumo beneficiando essas plantas.

O controle parcial do fluxo de C pelo Si modificou as concentrações de N e P; portanto, houve maior disponibilidade de N nos órgãos da planta, exceto no caule (Figura 3 e 4). Nossos resultados demonstram que a concentração de N nos órgãos é afetada pelo nível de fornecimento de Si, dado que houve considerável diferença nos níveis moderado (Si-2) e alto (Si-3) (Tabela 1). Neste sentido, maior disponibilidade de Si pode melhorar certos parâmetros fotossintéticos e promover a absorção de N, como indicado em pesquisas anteriores (Frazão et al., 2020), contradizendo outros resultados onde houve correlação negativa entre N e Si no tecido foliar (Murozuka et al., 2014). Além disso, pode ser sugerido o possível papel do Si em reduzir a permeabilidade da membrana plasmática, aumentando a atividade radicular e tendo como resultado maior absorção de nutrientes (Raven, 1983).

As concentrações de P aumentaram apenas nas folhas com aplicação de Si (Figura 4), sugerindo possível translocação de nutrientes da raiz e do caule para este tecido. Isto também foi relatado para plantas de trigo (Neu et al., 2017) e cana-de-açúcar (Teixeira et al., 2020), onde a aplicação de Si em solução nutritiva aumentou a disponibilidade de P nas folhas e foi indicado o envolvimento do Si no metabolismo de C e P, com alterações subsequentes na estequiometria dos nutrientes e na eficiência de uso. Estudos na literatura também têm sugerido que o Si afeta a regulação positiva da expressão de genes transportadores para a absorção de P, enquanto aumenta as taxas de exsudação de ácidos orgânicos que desempenham um papel na melhoria da absorção e na disponibilidade de P (Kostic et al., 2017).

As mudanças nas concentrações de nutrientes interferiram em suas proporções na planta. As relações estequiométricas entre os nutrientes são objeto de estudo porque a concentração de um nutriente nos tecidos vegetais é afetada pela produção de biomassa, interferindo também nas interações ecológicas devido à forte relação destes nutrientes nas funções biológicas e bioquímicas das plantas (Prado e Pereira, 2017). Os resultados indicaram que o Si substitui e diminui o C, aumenta a disponibilidade de N, enquanto as concentrações de P diferem para cada órgão da planta. Isso indica que as relações C:N e C:P foram alteradas nos diferentes órgãos, enquanto a relação N:P foi mais representativa para os grãos (Figura 5).

Houve variação na relação C:N nos diferentes tecidos porque o Si aplicado induziu diminuição nas concentrações de C, seguida pelo aumento das concentrações de N. No entanto, a diminuição da relação C:N foi mais acentuada no tecido foliar porque a concentração de C neste órgão diminuiu de forma mais significativa, enquanto não houve tendência significativa nas concentrações de C nos grãos. O padrão geral de redução das relações C:N, devido ao aumento das concentrações de Si, pode ser relativo ao declínio nos teores de compostos estruturais de C, conforme indicado anteriormente (Schaller et al., 2012; Hao et al., 2020).

Foi constatado que as relações C:N e C:P representam a capacidade da planta na fixação fotossintética de C através da disponibilidade de N ou P (Koerselman e Meuleman, 2019). Portanto, o maior teor de N verificado no tecido foliar demonstrou sua função na atividade fotossintética de fixar a parte formadora de C nos compostos orgânicos da planta (Sun et al., 2016). O efeito decrescente do Si na concentração de C, associado ao aumento da concentração de P, diminuiu principalmente a relação C:P nas folhas (Figura 5). No entanto, as mudanças na relação N:P foram devidas principalmente à maior disponibilidade de N no tecido foliar e nos grãos, interferindo na produção de biomassa e na composição da planta, conforme indicado anteriormente (Güsewell, 2004). As menores relações C:N e C:P apontam o papel do Si em manter o equilíbrio entre o C e os nutrientes N e P (Viciado et al., 2019). Neste contexto, o aumento da absorção e do acúmulo de Si contribui para manter e regular a homeostase das composições estequiométricas nos tecidos, aumentando os compostos estruturais de C com função metabólica importante ao favorecer os processos fisiológicos e bioquímicos da planta.

Nossa pesquisa indica que, para um melhor entendimento dos efeitos do Si no crescimento da quinoa e nas relações estequiométricas C:N:P, as diferentes respostas na eficiência de uso de nutrientes devem ser consideradas (Figura 6). A eficiência de uso de C aumentou de $0,087 \pm 0,003$ (Si-0) para $0,120 \pm 0,003$ (Si-1), $0,154 \pm 0,002$ (Si-2) e diminuiu para $0,151 \pm 0,00$ (Si-3). Este fato pode ser atribuído à maior incorporação de Si nos tecidos vegetais, atuando mais no processo fotossintético do que em compostos orgânicos de C substituídos por Si (Schaller et al., 2012; Teixeira et al., 2020).

A eficiência de uso de N afetada pelo Si (Figura 6), demonstra que a produção de biomassa aumentou quando a concentração de N nos órgãos da planta também foi maior. A eficiência de uso de N aumentou de $0,97 \pm 0,03$ (Si-0) para $1,30 \pm 0,05$ (Si-1), $1,56 \pm 0,05$ (Si-2) e $1,43 \pm 0,02$ (Si-3). Isso pode haver ocorrido devido a mudanças no metabolismo primário, o que estimula a translocação de aminoácidos para os tecidos absorvedores (Detmann et al., 2013), apoiado também pelo maior equilíbrio na composição de aminoácidos nos tecidos da quinoa (Thanapornpoonpong et al., 2008). O aumento na eficiência de uso de N por Si foi comprovado anteriormente em plantas de trigo (Neu et al, 2017), indicando ou mostrando aumento na produção de biomassa. A eficiência de uso de P aumentou de $8,50 \pm 0,24$ (Si-0) para $10,80 \pm 0,33$ (Si-1), $14,88 \pm 0,29$ (Si-2) e diminuiu para $13,15 \pm 0,09$ (Si-3). Esse aumento da eficiência de uso do P pode ter sido em decorrência da redução do custo de energia na substituição de Si por C nos compostos orgânicos.

Desta forma, a pesquisa demonstra que o Si melhorou a eficiência de uso de C, N e P, pois a planta produziu mais biomassa por unidade de N e P absorvida e corroborado pelas relações C:N e C:P reduzidas. Essa alta eficiência nutricional promovida pelo Si deve ter recebido contribuição de processos fisiológicos, pois têm-se relatos de que o elemento benéfico incrementa a eficiência fotossintética e o uso da água (Meunier et al., 2017).

Portanto, a maior disponibilidade de N fez com que a produção de biomassa aumentasse em órgãos da planta relacionados ao crescimento e ao armazenamento, como folhas e grãos, uma vez que, nesses tecidos, os compostos de C foram parcialmente substituídos por Si, além da translocação e do acúmulo de P; esses resultados são apoiados por pesquisas anteriores em outras espécies (Frazão et al., 2020; Neu et al, 2017; Schaller et al., 2012). Assim, o Si absorvido pelas plantas de quinoa alterou as relações estequiométricas C:N e C:P, principalmente aumentando a eficiência de uso destes elementos com consequente aumento da biomassa e da produtividade observada para as concentrações de Si aplicadas: 2,7 e 3 mmol L⁻¹, respectivamente.

5 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados demonstram que a quinoa absorve e acumula Si em ordem decrescente da seguinte forma: folha> grão> raiz> caule, enquanto a disponibilidade de Si na planta aumenta a biomassa e a produtividade do grão, devido à alteração da composição estequiométrica de nutrientes, diminuindo as concentrações de C e melhorando a eficiência de uso de N e P. Portanto, destaca-se a importância biológica do Si para as plantas de quinoa, que são muito tolerantes a diferentes estresses e apresentam alto valor nutricional. Podendo-se inferir que, possivelmente, os mecanismos de defesa da planta estão fortemente associados ao Si, indicando a necessidade de novos estudos com esta espécie em diferentes tópicos relacionados à nutrição de plantas.

6 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. **Journal of Plant Nutrition**, v. 27, p. 2101–2115.
- Basra, S. M. A.; Iqbal, S.; Afzal, I. 2014. Evaluating the response of nitrogen application on growth, development and yield of quinoa genotypes. **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 16, p. 886–892.
- Bataglia, O. et al. Métodos de análise química de plantas. **Boletim Técnico**. IAC. Campinas.
- Birchall, J. D. 1995. The essentiality of silicon in biology. **Chemical Society Reviews**, v. 24, p. 351–357.
- Hurtado, A. et al., 2020. Silicon application induces changes C:N:P stoichiometry and enhances stoichiometric homeostasis of sorghum and sunflower plants under salt stress. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 27, p. 3711–3719.
- Detmann, K. C. et al., 2013. Metabolic alterations triggered by silicon nutrition: Is there a signaling role for silicon? **Plant Signaling and Behavior**, v. 8, p. 71–74.
- Santos, L. C. N. et al., 2020. Response of Pre-sprouted Sugarcane Seedlings to Foliar Spraying of Potassium Silicate, Sodium and Potassium Silicate, Nanosilica and Monosilicic Acid. **Sugar Tech**, v. 22, p. 773–781.

EMBRAPA., 2018. Limpeza de Areia para Experimentos em Nutrição de Plantas. **Boletim Técnico**.

Faisal, S. et al., 2012. Transpiration-dependent passive silica accumulation in cucumber (*Cucumis sativus*) under varying soil silicon availability. **Botany**, v. 90, p. 1058–1064.

Frazão, J. J. et al., 2020. Silicon changes C:N:P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. **Scientific Reports**, v. 10, p. 1–11.

Greger, M.; Landberg, T.; Vaculík, M., 2018. Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. **Plants**, v. 7, p. 1–16.

Guignard, M. S. et al., 2017. Impacts of nitrogen and phosphorus: From genomes to natural ecosystems and agriculture. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 5.

Güsewell, S., 2004. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance. **New Phytologist**, v. 164, p. 243–266.

Hans, K., 1995. The composition of the continental crust. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 59, p. 1217–1232.

Hao, Q. et al., 2020. Silicon Affects Plant Stoichiometry and Accumulation of C, N, and P in Grasslands. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1–10.

Hedges, L. V; Gurevitch, J.; Curtis, P. S. 1999. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. **Ecology**, v. 80, p. 1150–1156.

Hinojosa, L. et al., 2018. Quinoa abiotic stress responses: A review. **Plants**, v. 7.

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

Kaur, H.; Greger, M., 2019. A review on si uptake and transport system. **Plants**, v. 8, p. 1–8.

Klotzbücher, T. et al., 2018. Variable silicon accumulation in plants affects terrestrial carbon cycling by controlling lignin synthesis. **Global Change Biology**, v. 24, p. 183–189.

Koerselman, W.; Meuleman, A. F. M. 2019. The Vegetation N:P Ratio : A new tool to detect the nature of nutrient limitation. **Journal of Applied Ecology**, v. 33, p. 1441–1450.

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

Kostic, L. et al., 2017. Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. **Plant and Soil**, v. 419, p. 447–455.

Krouk, G.; Kiba, T. 2020. Nitrogen and Phosphorus interactions in plants: from agronomic to physiological and molecular insights. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 57, p. 104–109.

Kudryavtsev, P. G.; Figovsky, O., 2016. Nanocomposite organomineral hybrid materials. **Nanotechnologies in Construction**, v. 8, 2016.

LIU, L. et al., 2020. Silicon effects on biomass carbon and phytolith-occluded carbon in grasslands under high-salinity conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1–13,.

LONG, M. et al., 2018. Effects of water and exogenous Si on element concentrations and ecological stoichiometry of plantain (*Plantago lanceolata* L.). **Journal of Plant Nutrition**, v. 41, p. 1263–1275.

MA, J. . et al., 2003. Genotypic variation in Si content of barley grain. **Plant Soil**, v. 249, p. 383–387.

Ma, J. F.; Yamaji, N., 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. 11, p. 392–397.

Meunier, J. D. et al., 2017. Effect of phytoliths for mitigating water stress in durum wheat. p. 229–239.

Murozuka, E. et al., 2014. Nitrogen fertilization affects silicon concentration, cell wall composition and biofuel potential of wheat straw. **Biomass and Bioenergy**, v. 64, p. 291–298.

Neu, S.; Schaller, J.; Dudel, E. G., 2017. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports**, v. 7, p. 3–10.

Pontigo, S. et al., 2015. Silicon in vascular plants: Uptake, transport and its influence on mineral stress under acidic conditions. **Planta**, v. 242, p. 23–37.

Prado, R.; Pereira, G., 2017. Ecological response to global change: Changes in C:N:P stoichiometry in environmental adaptations of plants. **Plant Ecology - Traditional Approaches to Recent Trends**. p. 2–19.

Raven, J., 1983. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews**, v. 58, p. 179–207.

Sardans, J.; Peñuelas, J., 2012. The role of plants in the effects of global change on nutrient availability and stoichiometry in the plant-soil system. **Plant Physiology**, v. 160, p. 1741–1761.

Schaller, J. et al., 2012. Silicon supply modifies C:N:P stoichiometry and growth of *Phragmites australis*. **Plant Biology**, v. 14, p. 392–396.

Schaller, J.; Brackhage, C.; Dudel, E. G., 2012. Silicon availability changes structural carbon ratio and phenol content of grasses. **Environmental and Experimental Botany**, v. 77, p. 283–287.

Schoelynck, J. et al., 2010. Silica uptake in aquatic and wetland macrophytes: A strategic choice between silica, lignin and cellulose? **New Phytologist**, v. 186, p. 385–391.

Siddiqi, M. Y.; Glass, A. D. M., 1981. Utilization index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 4, p. 289–302.

Silva, P. M. et al., 2020. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): An overview of the potentials of the “golden grain” and socio-economic and environmental aspects of its cultivation and marketization. **Foods**, v. 9, p. 31.

Sosa-Zuniga, V. et al., 2017. Phenological growth stages of quinoa (*Chenopodium quinoa*) based on the BBCH scale. **Annals of Applied Biology**, v. 171, p. 117–124.

Spehar, C. R., 2006. Adaptation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to increase the agricultural and alimentary diversity in Brazil. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 23, p. 41–62.

Struyf, E. et al., 2011. Tracing Si-N-P ecosystem-pathways: Is relative uptake in riparian vegetation influenced by soil waterlogging, mowing management and species diversity? **Hydrobiologia**, v. 674, p. 41–50.

Sun, J. et al., 2016. Nitrogen can improve the rapid response of photosynthesis to changing irradiance in rice (*Oryza sativa* L.) plants. **Scientific Reports**, v. 6, p. 1–10.

Takahashi, E.; Ma, J. F.; Miyake, Y., 1990. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. **Comments on Agricultural and Food Chemistry**, v. 2, p. 2–122.

Teixeira, G. C. M. et al., 2020. Root- and foliar-applied silicon modifies C: N: P ratio

and increases the nutritional efficiency of pre-sprouted sugarcane seedlings under water deficit. **PLoS ONE**, v. 15, p. 1–24.

Thanapornpoonpong, S. N. et al., 2008. Influence of various nitrogen applications on protein and amino acid profiles of amaranth and quinoa. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, p. 11464–11470.

Viciedo, D. et al., 2019. Short-term warming and water stress affect *Panicum maximum* Jacq. stoichiometric homeostasis and biomass production. **Science of the Total Environment**, v. 681, p. 267–274.

Zahoor et al., 2014. Role of Nitrogen Fertilizer in Crop Productivity and Environmental Pollution. **International Journal of Agriculture and Forestry**, v. 4, p. 201–206.

CAPÍTULO 3 – Formas de aplicação de Si em quinoa e os mecanismos envolvidos para associar aumento da produtividade com a biofortificação dos grãos

Resumo

O alto valor nutricional da quinoa à saúde humana é reconhecido e pode ser potencializado com o Si, mas não se conhece a melhor forma de fornecimento deste elemento e os mecanismos fisiológicos e nutricionais envolvidos na planta. Aqui, testa-se a hipótese de que a quinoa absorve o Si e pode ser potencializada com a aplicação combinada de Si via raiz e folha, promovendo maior produtividade e biofortificação dos grãos de quinoa. A aplicação de Si via raiz isolada e combinada com a foliar destacou-se, aumentando os teores de compostos fenólicos e a eficiência de absorção de N e P. O fornecimento de Si via radicular mais foliar promoveu a maior absorção do elemento pela planta, o que resultou no aumento da eficiência do uso de N e P, favorecendo o incremento da produtividade de grãos. O uso de modo otimizado da aplicação de Si na raiz mais foliar promoveu o maior teor de Si e ácido ascórbico nos grãos de quinoa. A aplicação combinada de Si radicular e foliar foi a melhor forma de fornecimento, pois promoveu a eficiência de uso de N e P, favorecendo o aumento da produtividade e da biofortificação de grãos com Si e ácido ascórbico. Este estudo traz informações sem precedentes, esclarecendo os benefícios do Si na quinoa, combinando produtividade e biofortificação, fortalecendo ainda mais a qualidade dos grãos para a saúde humana.

Palavras-chave: ácido ascórbico, aplicação foliar e radicular, *Chenopodium quinoa* Willd, eficiência nutricional, fenóis.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem havido um interesse crescente na cultura da quinoa, devido a seus potenciais benéficos à saúde humana, contendo todos os aminoácidos essenciais para o funcionamento do organismo e altos teores de minerais e vitaminas (Carciochi e Dimitrov, 2014; Dakhili et al., 2019), e favorecendo a prevenção de doenças (Hirose et al., 2010; Navruz-Varli e Sanlier, 2016). No entanto, é possível ampliar os benefícios da quinoa a partir da biofortificação com Si, dada a falta de informação sobre esse elemento.

O Si é considerado um elemento essencial para o homem, tendo papel fundamental na biologia óssea e nas funções do sistema nervoso e imunológico (Arora e Arora, 2017; Farooq e Dietz, 2015). Desse modo, a aplicação de Si na quinoa pode ser um método apropriado para obter grãos biofortificados e para melhorar a qualidade nutricional. Além disso, o Si também poderia aumentar o teor de ácido ascórbico, um antioxidante importante (Kim et al., 2017), e fonte de vitamina C para a saúde humana (Figuerola-Méndez e Rivas-Arancibia, 2015). Isto é importante para os grãos de quinoa, pois os teores de ácido ascórbico são relativamente baixos variando de 1,4 mg 100g⁻¹ (Gordillo-Bastidas et al., 2006) a 5 mg 100g⁻¹ (Koziol, 1992).

A biofortificação dos grãos é uma prática relativamente recente, mas reconhecidamente importante para melhorar a qualidade do alimento; no entanto, é preciso avançar de modo que possa incrementar, também, a produtividade. Este aspecto é relevante para fortalecer a cadeia produtiva da cultura especialmente o produtor rural, pois sabidamente sua remuneração está restrita apenas na produtividade, não sendo remunerado atualmente pela qualidade do grão. Portanto, é necessário inovar as pesquisas de biofortificação para associar-se com a produtividade, e para isso o modo de aplicação do elemento estudado, no caso o Si, deve ser mais bem entendido para incrementar sua absorção pela planta e também para os grãos.

A aplicação do Si pode ser realizada no meio de cultivo via solução nutritiva ou fertirrigação para propiciar absorção radicular e por pulverização foliar, para incrementar a absorção pelas folhas e também pelos grãos. Nos estudos de biofortificação, é utilizada a pulverização foliar dirigida aos órgãos reprodutivos das

plantas, como flores e grãos, tendo relatos de incremento do teor de Si nos grãos de plantas de soja e também promoveu aumento da produtividade (Shwethkumari et al., 2017). No entanto, o Si, quando fornecido via radicular na solução nutritiva, triplicou as concentrações do elemento em vagens de feijão-verde (Montesano et al., 2016). O Si contido nos vegetais é considerado bioacessível visto em um processo de digestão *in vitro* (D'Imperio et al., 2015); portanto, é uma fonte importante do elemento para seres humanos.

Os estudos com Si evidenciam seus efeitos em aumentar o crescimento e a produtividade das culturas (Coskun et al., 2019; Cuong et al., 2017). Este efeito benéfico do Si pode ocorrer a partir do incremento da absorção de nutrientes como N e P, que favorecem a produção de biomassa e o rendimento de culturas como a cana-de-açúcar (Fan et al., 2008) e o trigo (Kostic et al., 2017). Estes efeitos benéficos do Si na produtividade podem ter ocorrido devido à melhoria da eficiência nutricional para absorção e utilização do N e do P pelas plantas, mas isso não foi estudado pelos autores. Outro benefício do Si estaria envolvido na produção de compostos antioxidantes como os fenólicos, vistos em plantas de cevada (Vega et al., 2019), que pode favorecer o metabolismo da planta e, conseqüentemente, a produtividade, mas isso pode depender se a espécie absorve o Si.

A capacidade da quinoa para absorver Si ainda não é conhecida. Neste sentido, para avançar no melhor entendimento das respostas da quinoa ao Si, é pertinente avaliar as seguintes hipóteses: 1) a quinoa absorve o Si e pode ser potencializada quando utilizado o modo de aplicação via radicular, associada à foliar, comparada sua aplicação isolada; 2) se sim, a maior absorção de Si pela quinoa incrementará teores de compostos antioxidantes e a eficiência de absorção e de utilização de N e P pela planta, favorecendo aumento da produtividade, associado com maior biofortificação dos grãos com incremento dos teores de Si e ácido ascórbico.

Sendo aceitas essas hipóteses, será possível ampliar o conhecimento sobre o Si em outras espécies importantes, propiciando sistema de produção com maior sustentabilidade. Este experimento foi realizado para avaliar se a aplicação de Si poderia incrementar sua absorção e a eficiência nutricional de N e P e os teores de

compostos fenólicos na parte aérea das plantas de quinoa e incrementar a produtividade e a biofortificação dos grãos com Si e ácido ascórbico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Delineamento experimental e cultivo de quinoa

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação, na Universidade Estadual Paulista, município de Jaboticabal, Brasil, com plantas de quinoa da cultivar BRS Piabiru (Spehar et al., 2006), cultivadas em sistema de cultivo hidropônico. A temperatura da casa de vegetação foi mantida a $29,7 \pm 4,15^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $47 \pm 32\%$ durante o dia (Figura 1).

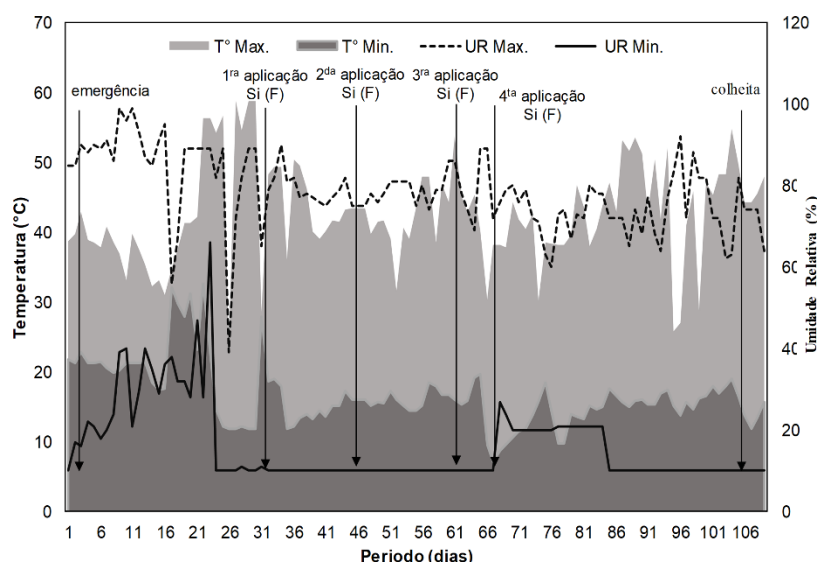


Figura 1. Condições experimentais na casa de vegetação. Variáveis climatológicas na casa de vegetação durante o experimento. Temperatura máxima (T° Máx.), temperatura mínima (T° Mín.), umidade relativa máxima (UR Máx.) e umidade relativa mínima (UR Mín.).

A fonte de Si utilizada na aplicação foliar e na solução nutritiva foi silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol [$\text{Si}=107,9 \text{ g L}^{-1}$; $\text{K}_2\text{O}=16,44 \text{ g L}^{-1}$; $\text{Na}_2\text{O} = 60,7 \text{ g L}^{-1}$, $\text{pH}=11,8$]. O sorbitol da fonte utilizada desempenha um papel indispensável como estabilizador de Si em soluções aquosas, diminuindo o processo de polimerização em pH abaixo de 7,0. A concentração de K na solução nutritiva e na aplicação foliar foi equilibrada, usando KCl, entre todos os tratamentos. Foi testada a concentração de 3 mmol L^{-1} de Si nas seguintes formas de aplicação: aplicação foliar

(F), aplicação radicular em solução nutritiva (R) e aplicação conjunta de Si a partir da solução nutritiva radicular e pulverização foliar (F+R), e o controle sem Si (0), dispostos em blocos casualizados, com cinco repetições por tratamento. A unidade experimental consistiu em um vaso de polietileno de 6,0 dm³, preenchido com areia lavada, contendo uma planta de quinoa.

A areia foi lavada com água corrente e, em seguida, com água deionizada e destilada (EMBRAPA, 2018). Realizou-se a semeadura e, após a emergência das plântulas, foi fornecida a solução nutritiva (Hoagland e Arnon, 1950), com substituição na fonte de ferro de Fe-EDTA para Fe-EDDHMA. A força iônica da solução iniciou com 10% durante os primeiros 10 dias após a emergência, e após foi para 25% na fase inicial vegetativa (até oito folhas verdadeiras), em seguida aumentou para 50% até ao início da floração, e após isso aumentou para 80% até ao início da formação do grão e, em seguida, atingiu 100% até o fim do experimento. O valor pH da solução nutritiva foi ajustado diariamente para $5,5 \pm 0,2$, com solução de HCl ou NaOH (1 N).

Foram realizadas quatro pulverizações foliares com Si, nas seguintes épocas: oito pares de folhas expandidas; plena floração; e na fase de grãos aquosos e leitosos. As aplicações foliares ocorreram pela manhã (6h às 7h), com umidade relativa do ar (70 a 90%) e temperatura (15 a 18°C), condições consideradas adequadas para a realização de pulverização foliar (Prado, 2020). O valor pH da solução para aplicação foliar foi mantido em $7,5 \pm 0,5$ usando solução de HCl 1 N, para aumentar a espécie química ácido monossilícico que, segundo Mitani e Jian (2005), é forma absorvida pelas plantas. O Si aplicado via radicular foi fornecido junto com a solução nutritiva durante todo o período experimental.

2.2 Análise da planta

Um dia antes do corte das plantas, discos foliares foram coletados na folha mais desenvolvida do terço superior da planta. O teor de compostos fenólicos totais na folha foi determinado a partir de reação colorimétrica e de leitura em espectrofotômetro, seguindo o método descrito por Singleton e Rossi (1965), e o teor de ácido ascórbico nos grãos foi determinado por titulação, de acordo com Strohecker et al. (1967).

Após a coleta, as plantas foram lavadas em água deionizada com solução detergente (0,1%), solução de HCl (0,3%) e, finalmente, água deionizada (Prado, 2020). Em seguida, a planta foi separada em raiz, caule, folha e grãos, e seca em estufa a 65°C até atingirem massa constante; posteriormente, obteve-se a massa seca. O teor de N foi obtido pelo método de combustão a seco (1.000°C), utilizando um analisador elementar (LECO TruSpec CHNS), calibrado com o padrão de trigo LECO 502-278 (C=45,00% e N=2,68%). O teor de P foi determinado usando o método colorimétrico de antimônio do molibdênio (Bataglia et al., 1983). Para a determinação do teor de Si, foi realizada a digestão úmida, pela adição de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e hidróxido de sódio (NaOH), com a reação induzida em autoclave a 123°C. A leitura do teor de Si foi realizada pelo método de colorimetria com ácido clorídrico, ácido oxálico e molibdato de amônio (Korndörfer et al., 2004). A partir dos resultados dos teores de N, P e Si na parte aérea e a sua matéria seca, realizou-se o cálculo do acúmulo destes elementos, expresso em mg por planta. O resultado da produtividade de grãos foi expresso em g por planta e corrigida a umidade para 15% (Spehar et al., 2006)

2.3 Análise estatística

Os dados foram analisados quanto à normalidade, usando-se o teste de K-S e homogeneidade, pelo teste de Bartlett; posteriormente, o efeito dos tratamentos foi submetido à análise de variância. As médias foram comparadas por meio do teste de Tukey, quando ($p \leq 0,05$), utilizando o software SAS Versão 9,1 (SAS Institute, Cary, NC, EUA).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Absorção e acúmulo de Si pela quinoa

Os mecanismos de absorção de Si nas plantas, quando aplicado via radicular, são conhecidos (Mitani e Jian, 2005), e as plantas são classificadas a partir do teor foliar de Si ditas não acumuladoras ($<5 \text{ g kg}^{-1}$), intermediárias (5 a 10 g kg^{-1}) e acumuladoras ($>10 \text{ g kg}^{-1}$) (Takahashi et al., 1990). Observou-se que o teor de Si nas folhas de quinoa, em função da aplicação de Si (R), foi $9,4 \text{ g kg}^{-1}$ (Figura 2a). Desse

modo, evidencia-se a informação inédita de que a quinoa é considerada planta intermediária para acúmulo de Si.

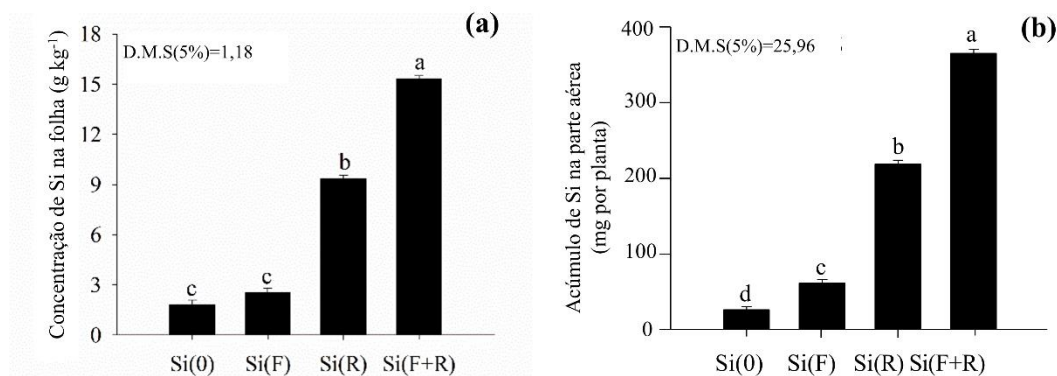


Figura 2. Concentração de Si na folha (a) e acúmulo de Si na parte aérea (b) em plantas de quinoa, de acordo com diferentes formas de aplicação de Si; sem aplicação de Si [Si(0)]; aplicação foliar de Si [Si(F)]; aplicação radicular de Si [Si(R)]; aplicação combinada de Si radicular e foliar [Si(F+R)]. Letras indicam diferenças significativas entre as médias da aplicação de Si ($p < 0,05$); diferença mínima significativa [DMS]. Barras verticais representam o EP da média.

Essa informação nova pode ser evidenciada neste estudo, pois houve incremento da absorção de Si indicado pelo seu acúmulo na planta, especialmente na forma de aplicação do elemento (F+R), que se destacou dos demais tratamentos embora a aplicação foliar se diferenciasse do controle (Figura 2b). Esse fato comprova parte da primeira hipótese indicando que a aplicação de Si foliar associada à radicular, possibilitaria maior absorção de Si pelas plantas de quinoa. Este efeito indica a importância do fornecimento contínuo do Si em todo o ciclo via solução nutritiva complementado com as pulverizações foliares, e apenas a aplicação exclusiva desta última não promove maior absorção do elemento benéfico dado, o fato de que a mesma foi fornecida pontualmente em apenas quatro pulverizações durante o ciclo da cultura.

3.2 Silício aumenta absorção de N, P e teor de compostos antioxidantes

Observou-se que houve incremento do acúmulo de N e P e também na eficiência de absorção com a aplicação de Si, destacando-se o fornecimento de Si (F+R) semelhante ao Si (R) (Figuras 3a, b, c, d). Além disso, foi evidente a influência das formas de aplicação de Si na produção de compostos fenólicos nas folhas (Figura

3e). Portanto, ficou nítido o efeito do Si no aumento da absorção de N, P e teor de fenóis da parte aérea da planta.

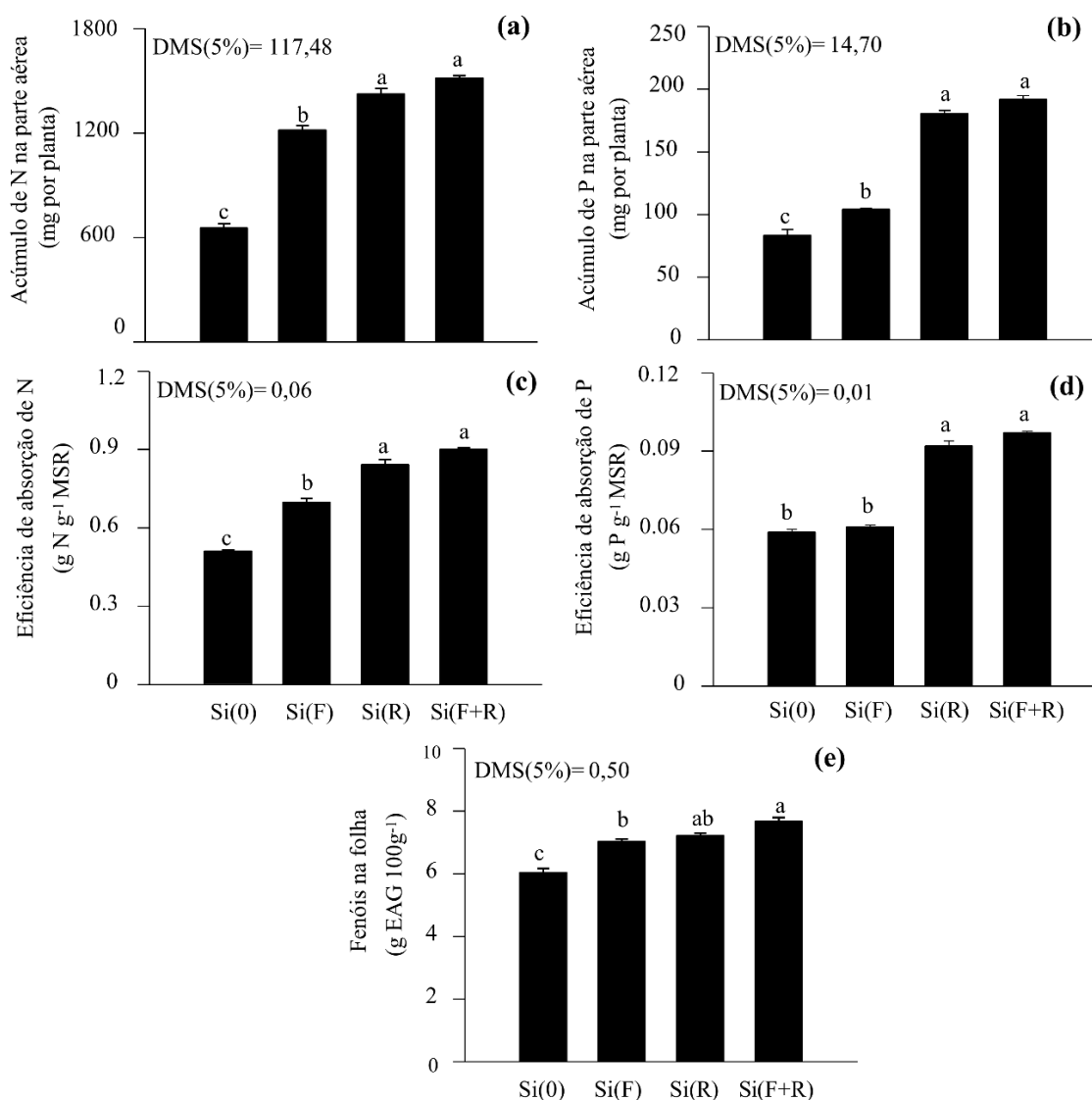


Figura 3. Acúmulo de N (a) e P na parte aérea (b), eficiência de absorção de N (c) e P (d) e teor de compostos fenólicos na folha (e), em plantas de quinoa, de acordo com diferentes formas de aplicação de Si; sem aplicação de Si [Si(0)]; aplicação foliar de Si [Si(F)]; aplicação radicular de Si [Si(R)]; aplicação combinada de Si radicular e foliar [Si(F+R)]. Letras indicam diferenças significativas entre as médias da aplicação de Si ($p < 0,05$); diferença mínima significativa [DMS]. Barras verticais representam o EP da média.

Embora este efeito não seja conhecido em plantas de quinoa, existem indicações de que podem explicar esses efeitos. O benefício do Si no incremento da absorção de N foi relatado na cultura de cana-de-açúcar (Fan et al., 2008), e de P na

cultura de trigo (Kostic et al., 2017), explicado pelo fato de que o Si pode regular a fotossíntese e a transpiração, e aumentar a expressão de genes transportadores do nutriente nas membranas. Este efeito do Si no aumento da produção de compostos fenólicos foi relatado na cultura de cevada por estar envolvido na modulação do metabolismo de fenóis (Vega et al., 2019).

3.3 Silício melhora a qualidade e produtividade de grãos de quinoa

Neste estudo, os tratamentos com Si (R) e (F+R) promoveram o maior incremento da massa seca da parte aérea, mas para produtividade de grãos, a aplicação combinada de Si (F+R) teve melhor desempenho do que os tratamentos exclusivos de Si (F) e (R) (Figuras 4c, d). A aplicação de Si (F+R) é promissora dada a resposta da planta evidenciada pelo aumento da produtividade de grãos em 84%, em comparação ao controle (0).

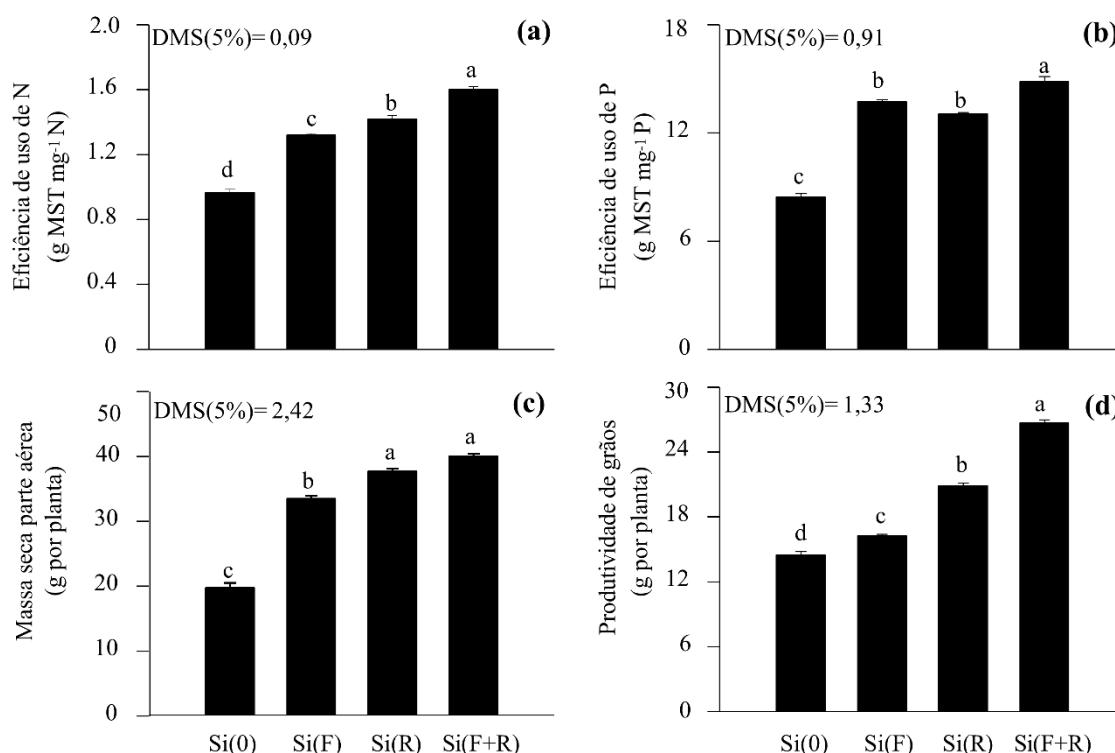


Figura 4. Eficiência de uso de N (a) e P (b), massa seca da parte aérea (c) e produtividade de grãos (d), em plantas de quinoa, de acordo com diferentes formas de aplicação de Si; sem aplicação de Si [Si(0)]; aplicação foliar de Si [Si(F)]; aplicação radicular de Si [Si(R)]; aplicação combinada de Si radicular e foliar [Si(F+R)]. Letras indicam diferenças significativas entre as médias da aplicação de Si ($p < 0,05$); diferença mínima significante [DMS]. Barras verticais representam o EP da média.

Este efeito ocorreu devido ao uso da melhor forma de fornecimento de Si (F+R) que promoveu a maior absorção do elemento pela planta, resultando em incremento na eficiência de uso do N e do P (Figuras 4a, b), ou seja, esses nutrientes tiveram mais eficiência para exercer suas funções biológicas e, conseqüentemente, maior conversão do nutriente absorvido em produção de grãos. Portanto, este novo achado corrobora nossa segunda hipótese, indicando que a maior absorção de Si pela quinoa poderia favorecer o incremento de produtividade de grãos.

Além dos benefícios do Si na produtividade da quinoa, os resultados demonstraram que a aplicação de Si (R) e a combinação (F+R) promoveram incremento igual a 110 e 170%, respectivamente, no teor do elemento nos grãos, em relação à aplicação foliar de Si isolada (Figura 5a). Portanto, ficou evidente que o uso de modo otimizado da aplicação de Si na forma combinada (F+R) é possível para promover alta biofortificação dos grãos com Si. Cabe destacar que o consumo médio de quinoa por pessoa, para atender a parte das recomendações diárias nutricionais, é de 40 g (Graf et al., 2015), e a ingestão mínima de Si para adultos é 50 mg por dia (Jugdaohsingh et al., 2002). E considerando os resultados referentes ao teor de Si nos grãos de quinoa com a aplicação deste elemento via foliar, radicular e combinada (F+R), poderia contribuir para uma ingestão diária de 76, 155 e 205 mg de Si, enquanto grãos sem aplicação deste elemento forneceriam ingestão de 39 mg Si por dia, não atingindo o requerimento mínimo diário de Si para o ser humano.

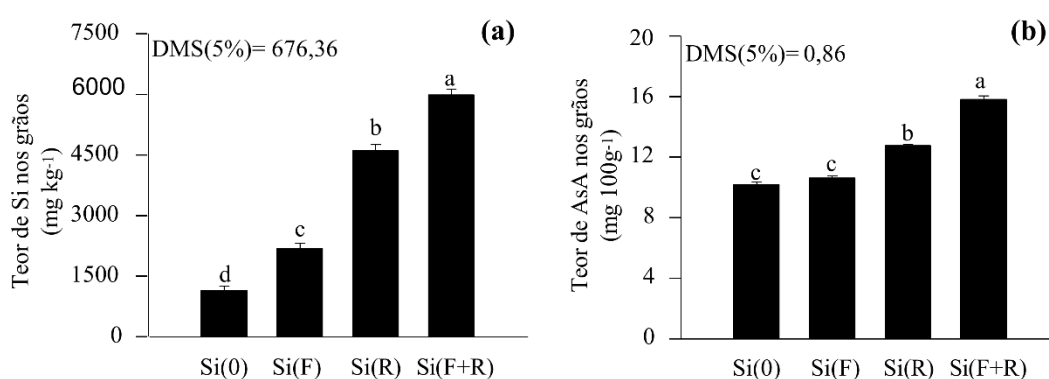


Figura 5. Teor de Si (a) e ácido ascórbico nos grãos (b) de plantas de quinoa, de acordo com diferentes formas de aplicação de Si; sem aplicação de Si [Si(0)]; aplicação foliar de Si [Si(F)]; aplicação radicular de Si [Si(R)]; aplicação combinada de Si radicular e foliar [Si(F+R)]. Letras indicam diferenças significativas entre as médias

da aplicação de Si ($p < 0,05$); diferença mínima significante [DMS]. Barras verticais representam o EP da média.

Por outro lado, sabe-se que os grãos de quinoa apresentam baixo teor de ácido ascórbico, mas quando foi realizada a aplicação de Si otimizada (F+R), esse teor atingiu valor máximo de $15,8 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ (F+R) (Figura 5b), bem superior aos valores relatados por outros autores ($4 - 5 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$) (Koziol, 1992) e $1,4 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ (Gordillo-Bastidas et al., 2006). No entanto, esse efeito foi relatado em plantas de arroz (Das et al., 2018), acelga e couve (Souza et al., 2019), pelo fato de que o Si estimula a produção de antioxidantes não enzimáticos, como o ascorbato. Esse achado é inédito nos estudos com biofortificação de Si, indicando efeito extra deste elemento no incremento do teor de ácido ascórbico resolvendo essa deficiência da quinoa, que é uma fonte alimentar pobre desta vitamina.

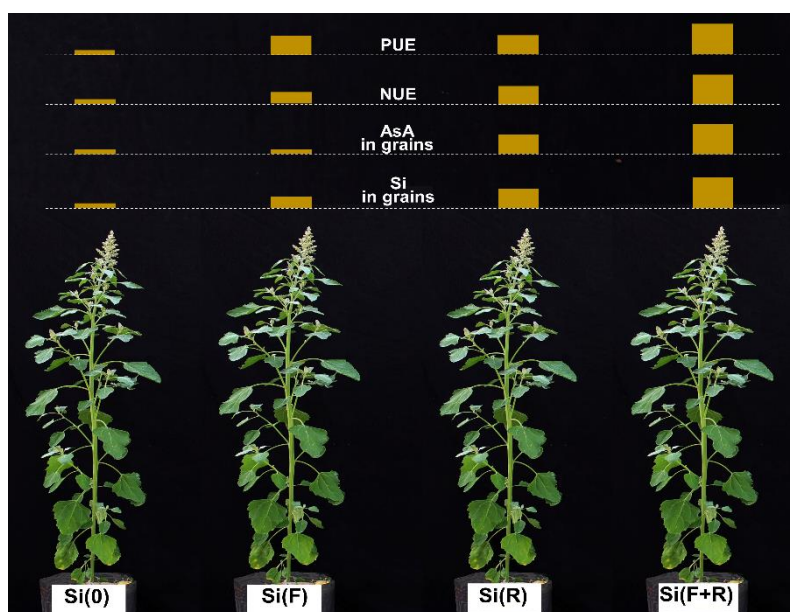


Figura 6. Resumo gráfico: aplicação de Si foliar mais radicular promove a produtividade de grãos de quinoa por aumentar a eficiência de uso de N e P; e qualidade dos grãos pelo incremento de teores de Si e ácido ascórbico.

As descobertas deste estudo elucidam que a quinoa é uma espécie intermediária para a absorção de Si e propõem que sua aplicação de forma adequada propicia conciliar o incremento da produtividade e da biofortificação de grãos (Figura 6). Por fim, este estudo abre novas perspectivas para que as pesquisas possam

avançar, especialmente em condição de campo, para que possa definir doses do elemento e fontes que possam melhorar a sustentabilidade dos cultivos de quinoa.

4 CONCLUSÃO

A melhor forma de aplicação de Si para a cultura da quinoa foi a combinada radicular e foliar, pois resultou em maior eficiência de uso de N e P, promovendo a maior produtividade e biofortificação dos grãos com Si e ácido ascórbico. Este estudo traz informação inédita, elucidando os benefícios do Si para a quinoa, conciliando a produtividade e a biofortificação e fortalecendo ainda mais a qualidade dos grãos tão nobres para a saúde do homem.

5 REFERÊNCIAS

Arora, M.; Arora, E., 2017. The Promise of Silicon: bone regeneration and increased bone density. **Journal of Arthroscopy and Joint Surgery**, v.4, p.103–105.

Bataglia, O. et al. Métodos de análise química de plantas. **Boletim Técnico**. IAC. Campinas.

Carciochi, R. A.; Dimitrov, K.. 2014. Optimization of antioxidant phenolic compounds extraction from quinoa (*Chenopodium quinoa*) seeds. **Journal of Food Science and Technology**, v.52, p.4396–4404.

Coskun, D. et al., 2019. The controversies of silicon's role in plant biology. **New Phytologist**, v.221, p.67–85.

Cuong, T. X. et al., 2017. Effects of silicon-based fertilizer on growth, yield and nutrient uptake of rice in tropical zone of Vietnam. **Rice Science**, v.24, p.283–290.

D'Imperio, M. et al., 2015. Silicon biofortification of leafy vegetables and its bioaccessibility in the edible parts. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.96, p.751–756.

Dakhili, S. et al., 2019. Quinoa protein: Composition, structure and functional properties. **Food Chemistry**, v.299, p.125–161.

Das, P. et al., 2018. Exogenous silicon alters ascorbate-glutathione cycle in two salt-stressed indica rice cultivars (MTU 1010 and Nonabokra). **Environmental Science and Pollution Research**, v.25, p.26625–26642.

EMBRAPA., 2018. Limpeza de Areia para Experimentos em Nutrição de Plantas. **Boletim Técnico**.

Fan, B.; You, J.; Chen, Y., 2008. Study on the effect of sugarcane under the middle elements. **Modern Agric. Sci. Technol**, v.11, p.173–174.

Farooq, M. A.; Dietz, K. J., 2015. Silicon as versatile player in plant and human biology: Overlooked and poorly understood. **Frontiers in Plant Science**, v.6, p.1–14.

Figueroa-Méndez, R.; Rivas-Arancibia, S., 2015. Vitamin C in health and disease: Its role in the metabolism of cells and redox state in the brain. **Frontiers in Physiology**, v.6, p.1–11.

Gordillo-Bastidas, E. et al., 2006. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd), from nutritional value to potential health benefits: an integrative review. **J Nutr Food Sci**, v.6, p.497.

Graf, B. L. et al., 2015. Innovations in health value and functional food development of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v.14, p.431–445.

Hirose, Y. et al., 2010. Antioxidant properties and flavonoid composition of *Chenopodium quinoa* seeds cultivated in Japan. **Food Chemistry**, v.119, p.1300–1306.

Hoagland, D.; Arnon, D., 1950. The water culture method for growing plants without soils. **Circular**, v.347, p.32.

Jugdaohsingh, R. et al., 2002. Dietary silicon intake and absorption. **American Journal of Clinical Nutrition**, v.75, p.887–893.

Kang, J. et al., 2014. Sodium (Na⁺) and silicon (Si) coexistence promotes growth and enhances drought resistance of the succulent xerophyte *Haloxylon ammodendron*. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.60, p.659–669.

Kim, Y. H. et al., 2017. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: A review. **Frontiers in Plant Science**, v 8, p.1–7.

Korndörfer, G.; Pereira, H.; Nolla, A., 2004. Análise de silício: solo, planta e fertilizante. **Boletim Técnico**, Ubêrlandia, n.2, p.34.

Kostic, L. et al., 2017. Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. **Plant and Soil**, v.419, p.447–455.

Koziol, M., 1992. Chemical composition and nutritional evaluation of quinoa

(*Chenopodium quinoa* Willd.). **Journal of Food Composition and Analysis**, v.5, p.35–68.

Mitani, N.; Jian, F. M., 2005. Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany**, v.56, p.1255–1261.

Montesano, F. F. et al., 2016. Green bean biofortification for Si through soilless cultivation: Plant response and Si bioaccessibility in pods. **Scientific Reports**, v.6, p. 1–9.

Navruz-Varli, S.; Sanlier, N., 2016. Nutritional and health benefits of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). **Journal of Cereal Science**, v.69, p.371–376.

Prado, R. M. 2020. **Nutrição de plantas**. 2a Edição ed. Funep, Jaboticabal

Shwethkumari, U. et al., 2017. Effect of foliar application of silicic acid on growth, field and quality of soybean. **In Proceedings of the 7th International Conference on Silicon in Agriculture**, p.146.

Singleton, V.; Rossi, J., 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American J Enology Viti**, v.16, p.144–158.

Souza, J. Z. et al., 2019. Silicon leaf fertilization promotes biofortification and increases dry matter, ascorbate content, and decreases post-harvest leaf water loss of chard and kale. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.50, p.164–172.

Spehar, C. R.; Lorena, R.; Santos, D. B., 2006. Agronomic performance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd .) under two moisture regimes in a brazilian savanah soil. **Biosci. J.**, v.22, p.61–66.

Strohecker, R.; Zaragoza, F.; Henning, H., 1967. Análisis de vitaminas: métodos comprobados. ed. Madrid Paz Montalvo.

Takahashi, E.; Ma, J. F.; Miyake, Y., 1990. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. **Comments on Agricultural and Food Chemistry**, v.2, p.2–122.

Vega, I. et al., 2019. Silicon improves the production of high antioxidant or structural phenolic compounds in barley cultivars under aluminum stress. **Agronomy**, v.9, p.1–15.